

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Câmbio Eletro-Mecânico de Bicicleta

nota final
5,20
(cursos e docs)

hsm

Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Graduação em Engenharia

Daniel Gustavo Unzer Falcade
Luis Antonio Pereira de Lima

Orientador:
Prof. Osvaldo Horikawa

Área de Concentração: Engenharia Mecatrônica

São Paulo
2003

“

“Na vida e nas pistas enfrentai as subidas, pois são estas que te encaminham ao topo do mundo”

Bill Pownders

Agradecimentos

Agradecemos a todos aqueles que, seja por meio de uma argüição curiosa, seja através de um par de sugestões, promoveram nossa empolgação por continuar criando.

Destacamos a ajuda que nos foi dada por todos os funcionários do Laboratório de Máquinas Operatrizes da presente escola e, sobremaneira, a presença discreta de nossos pais, provedores dos insumos – materiais ou não – que nos desvincularam dos problemas cotidianos, reservando nossa mente e nosso corpo a esta obra.

Resumo

É possível controlar o conjunto homem-bicicleta a partir de um dispositivo eletro-mecânico que administre automaticamente a relação de transmissão de uma bicicleta? Se considerarmos que o atleta efetua as mudanças do câmbio a partir de um determinado conjunto de critérios de julgamento, consciente ou mesmo inconscientemente, será possível modelar matematicamente esses critérios de julgamento? As duas perguntas estão intimamente relacionadas. Pois se for possível se determinar os critérios de julgamento de um ciclista baseado em um conjunto de variáveis sensoriais, é possível a implementação de um sistema de controle que tome essa decisão no lugar do ser humano, e talvez de forma até mais eficiente, por poder possuir um caráter objetivo e antecipativo. E, sendo esse controle possível, qual a fronteira tecnológica existente à sua implementação? O desenvolvimento de um mecanismo atuador que permita uma troca eficiente de marchas a partir de um sinal elétrico de baixa potência provindo do controlador. O trabalho se envereda para muito perto das duas fronteiras - eletrônica e mecânica - que separam a humanidade da tão sonhada bicicleta inteligente.

Abstract

Once upon a time, the humanity has dreamed: is it possible to control the system composed by man&bicycle with an electro-mechanical dispositive that manages automatically the transmission relation of the bicycle's gear? If we consider that the cyclist makes the changes based upon a certain number of judgement criteries, conscious or even unconsciously, is it possible to modelate matematically these criteries? Both questions are closely related. Because if it's possible the determination of the athlete judgement criteries based in a group of sensoriable variables, it's possible the implementation of a control system that takes this decision in the human kind 's place, and maybe even better. In this case, what the technological frontier to its implementation? The development of a low power actuation mecanism, activable from a controller's electric signal. The work paths and tries to reach the two fronteras - eletronic an mechanical- at once , frontieres that separate the humanity from the old dream of a intelligent bicycle.

Índice

Índice

Definição do Problema

Introdução	8
O câmbio de bicicleta	9
O uso do câmbio no ciclismo	10
O treinamento ciclístico	11
A Otimização	12
O Problema	13

Desenvolvimento da Solução

Introdução	14
Os parâmetros biomédicos no esporte	14
A correlação entre os parâmetros biomédicos	16
Zonas e limites de trabalho do coração	17
Crítérios de Julgamento	18
Variáveis de Interesse	19
Equacionamento do Problema	20
Discussão sobre batimento cardíaco e rotação do pedal como parâmetros de desempenho no ciclismo	23

O Controle do Sistema

Motivação	26
Considerações Iniciais	27
Os tipos de Controle do Sistema	28
Descrição do Sistema de Controle	34
Desenvolvimento da Lógica de Controle	36
Representação do Sistema de Controle em MFG	37
O software desenvolvido	38
Funcionamento do software	39
Implementação do Sistema de Controle	41

O Mecanismo Atuador

Introdução	42
Propriedades	42
Delineando a Solução	44
A Concepção	45
A bicicleta protótipo e suas características	51
Escolha da Mola	53
Definição do Número de Pinos p	54
A Solução Final	56
Escolha de materiais e Peças Prontas	57
Formalização, Execução e Registros	59
Montagem e Teste	60
Melhorias e Próximos Passos	62

Conclusão

63

Bibliografia

64

Apêndice I - Estrutura de um MFG

65

Apêndice II - Planilhas de Estudo da Mola e Definição de Parâmetros

67

Apêndice III - Listagens dos Softwares Relacionados

74

Definição do Problema

Introdução

Há muito tempo o homem convive com a bicicleta. Uma vez inventada, sua enorme potencialidade sempre foi bem explorada, sendo utilizada como meio de transporte, de diversão e para fins atléticos, competitivos ou não. Servindo uma mesma

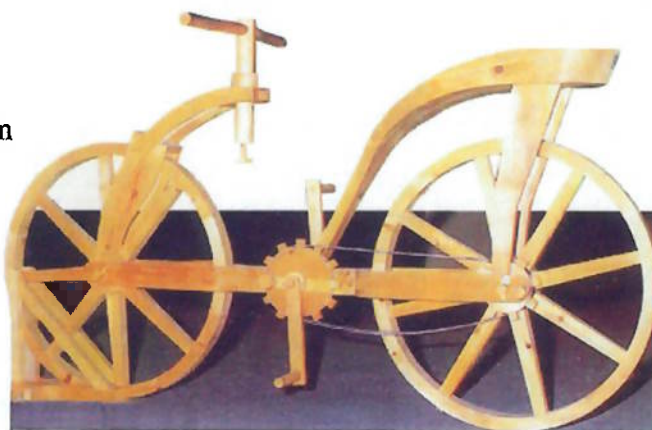


Fig. 1 - A bicicleta com transmissão idealizada por Leonardo da Vinci

invenção ao jornaleiro que a utiliza como instrumento de trabalho, ao campeão mundial de ciclismo, aos que as utilizam para chegar a trilhas de difícil acesso, aos habitantes de cidades poluídas que buscam uma alternativa mais saudável aos automóveis ou a qualquer pessoa que procure um divertimento simples ou um exercício leve, a bicicleta logo sofreu modificações que a tornassem mais confortável, prática, resistente, rápida, entre outras qualidades.

Tal foi a preocupação em aprimorá-la que até mesmo o gênio renascentista Leonardo da Vinci dispensou esforços na idealização de uma bicicleta dotada de uma característica que pode ser considerada como precursora do câmbio de bicicletas: a diferença de dentes existentes no pinhão e na coroa, ou seja, nas rodas dentadas traseira e dianteira, por onde passa a corrente (Figura 1). Essa configuração, que perdura até hoje, aumenta o número de giros da roda por pedalada em comparação à relação 1 para 1 (pinhão e coroa de mesmo tamanho), padrão até então. Essa relação permite uma melhor conversão da potência em velocidade, que passa a ser obtida à custa de uma maior força, e não de uma maior frequência de pedaladas.

O câmbio de bicicleta

Por perceber que diferentes relações de transmissão possuíam diferentes vantagens e se adequavam a diferentes situações, os entusiastas do ciclismo passaram a se debruçar sobre a idéia de um câmbio. Dá-se o nome de câmbio ao aparato capaz de modificar a relação de transmissão da rotação do pedal à roda traseira da bicicleta. O câmbio permite ao ciclista mudar para marchas mais leves ou mais pesadas (diminuir ou aumentar a relação, respectivamente) ao sentir que o esforço é demasiado ou a sentir que seu potencial está sendo sub-aproveitado, respectivamente.

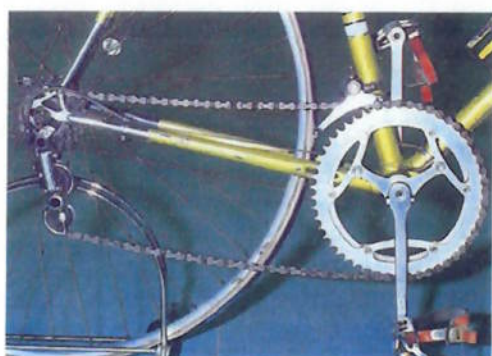


Fig. 2 - O câmbio de bicicleta

Em 1914, foram criados os primeiros modelos de câmbio, nos quais era necessário ajustar-se a roda a cada mudança de marcha de marcha em virtude do afrouxamento da corrente. Esse inconveniente foi abolido em 1920 pelo italiano Alfredo Binda, que desenvolveu uma alavanca tensionadora para a corrente. Mas foi a partir de 1924, quando os também italianos Girardengo e Bottechia dominaram o mundo das competições com seu câmbio Vittória de quatro velocidades, que o câmbio firmou-se como um equipamento indispensável ao ciclismo de alta performance. Maiores invenções viriam depois da Segunda Grande Guerra, quando o sr. Túlho Campagnolo multiplicou as possibilidades desse aparato, ao acrescentar ao câmbio traseiro um câmbio dianteiro independente.

Pesquisas e inovações continuam até hoje, e novos requisitos como leveza e velocidade de troca passaram a ser fatores determinantes na escolha desse tipo de equipamento.

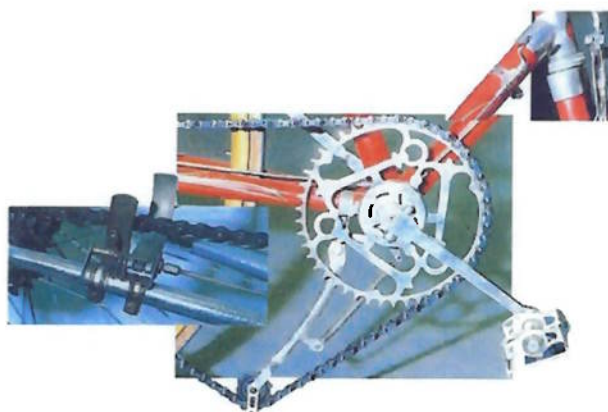


Fig. 3 - O inovador câmbio Vittoria

O uso do câmbio no ciclismo

O chamado ciclismo, a corrida de bicicletas, diferentemente dos esportes de deslocamento congêneres como a corrida e a natação, é uma atividade na qual o esforço despendido pelo atleta não é transformado em movimento de maneira direta, mas sim um por uma máquina que utiliza o esforço humano para girar suas rodas e com isso produzir movimento.

Por isso, o advento dessa inovação, o câmbio, teve enormes conseqüências na prática desse esporte. Consistindo a invenção num manipulador de relação de transmissão, tornou-se necessário ao praticante não só uma alta performance, como também o uso sensato da novidade.

O câmbio permite ao ciclista modificar (aumentar ou diminuir) a relação de transmissão de modo a adequá-la a sua necessidade. Assim, por exemplo, em uma subida deve-se escolher uma marcha mais leve enquanto que em uma reta deve-se aumentar progressivamente o peso das marchas de modo que sua aceleração e sua velocidade final sejam as maiores possíveis.

Obviamente, sendo um esporte extremamente competitivo, logo os ciclistas se tornaram muito bons nisso. E, para vencer, o atleta deveria aprimorar sua técnica de mudanças de marcha de modo a utilizá-la melhor que os rivais.



Fig. 4- O moderníssimo câmbio Victorio Maxximo de nove velocidades

O treinamento ciclístico

O desenvolvimento dessas técnicas, no entanto, não se restringe à competição em si. É fundamental que durante os treinos o atleta utilize as marchas de modo a explorar ao máximo seu potencial atlético, sem, contudo, prejudicar seu organismo com sobre-esforços. Nesse ponto destaca-se o papel do treinador: elaborar programas de exercício que maximizem o potencial atlético e a performance do atleta dentro dos limites convenientes ao mesmo.

A escolha das marchas é um ponto fundamental a ser considerado em um programa de treinamento, pois é o parâmetro de controle do esforço do atleta. Seja o propósito duma atividade a simples manutenção da boa forma física ou a busca de uma alta performance competitiva, as condições do ambiente (velocidade e direção do vento, inclinação do terreno, entre outras) variam ao longo da atividade. Além disso, o próprio desgaste do atleta também é responsável pela variação das condições de treinamento. Deste modo, otimizar um treinamento ciclístico significa implementar uma constante adequação da relação de transmissão às condições ambientais e físicas do atleta.



Fig. 4 - O campeão Bill "The Evil Pownders" em treinamento no Alabama

A Otimização

Essa otimização não passa de um julgamento. Conhecidas as consequências de determinada mudança de marcha sobre o organismo humano e sobre o conjunto homem-bicicleta, o ciclista passa a avaliar os benefícios e desvantagens da efetuação desta mudança em um determinado momento.

Como exemplo, o ciclista acredita estar bem próximo do seu limiar aeróbico (conceito que será oportunamente explicado). Ele deseja ir mais rápido e quer saber se aumentando o peso da marcha (aumento da relação de transmissão) ele conseguirá esse incremento na velocidade e se seu nível de esforço não ultrapassará o citado limiar. Como ele faz esse julgamento? Quanto mais experiente, melhor esse mesmo atleta conhecerá seus próprios limites e mais adequadamente fará essa avaliação. O autoconhecimento do atleta é, portanto, fundamental para esse julgamento durante uma competição.

Em geral, o papel de um treinador é ensinar o atleta a obter um aprimoramento desse auto-conhecimento e do conhecimento da interação homem-máquina-ambiente, isto é, saber como proceder na ocorrência de variações nas condições externas (ambientais – subidas e descidas, ventos, diferentes tipos de solo) para tirar o melhor proveito possível no *timing* do sequenciamento das marchas de sua bicicleta, de modo a obter dela um desempenho ótimo.

O Problema

O problema que acaba se originando consiste na *determinação dos critérios desse julgamento, e quais as variáveis necessárias e suficientes para a avaliação coerente e em tempo real desses critérios para a elaboração de um método de julgamento que não só leve em consideração o que o atleta deseja fazer, mas também avalie também as condições físicas do mesmo e as condições ambientais do momento*. A partir da formalização desses critérios de julgamento, *elaborar um algoritmo que a partir de variáveis coletáveis durante a atividade elabore uma otimização do treinamento ciclístico baseado nas particularidades de cada ciclista*. E, por fim, conhecido esse algoritmo seria possível implementar um *dispositivo* que, além de julgar e otimizar, tivesse participação ativa no processo de troca, tornando desnecessária a intervenção humana nesse processo?

Em poucas palavras, o que se deseja é criar meios para que ocorra uma *otimização sem que o ciclista deva se preocupar com a mesma durante sua atividade atlética, uma otimização automática*.

Vale ressaltar que esse advento seria duplamente proveitoso à performance do atleta, pois o eximiria do risco de erros na escolha da marcha ao mesmo tempo deixaria que toda a sua atenção se voltasse à execução do esforço atlético em si.

Desenvolvimento da Solução

Introdução

Quando se trata de ciclismo, as palavras *otimização* e *automatização* devem ser lidas sob a ótica da realidade desse esporte. Guiar-se-ão, portanto, quaisquer elocubrações sobre a solução a ser proposta, por duas realidades inerentes ao ciclismo: o fato de que, como em todo o esporte, não há procedimento considerado tão absolutamente correto que não deva ser consagrado pelo pragmatismo de seus resultados e não se tem bagagem experimental divulgada sobre o estudo de sistemas automáticos em bicicletas e sua factibilidade, principalmente em atividades de alto desempenho.

Com base nessas preocupações, nessa segunda parte serão expostos e analisados quanto à sua adequação à realidade os parâmetros de controle de desempenho do atleta, bem como será desenvolvida uma modelagem do conjunto interativo homem-mecanismo-ambiente.

Os parâmetros biomédicos no esporte

Idade, peso, porcentagem massa adiposa, flexibilidade, força, entre outros. É possível a definição de infinitas medidas que visem nos fornecer um panorama de quão preparado um atleta possa estar para a execução de suas atividades.

No entanto, para um controle em tempo real da atividade, são mais adequadas àquelas medidas que variem não de tempos em tempos (como o peso, a força ou a taxa de gordura), mas que dependam diretamente do modo de atividade do instante, e que respondam às mudanças na atitude de treino quase que instantaneamente.

Nessa classe incluem-se três principais parâmetros:

Índice de lactato do sangue

Também conhecido apenas por lactato, mede a taxa de ácido láctico presente no sangue do atleta em milimoles por litro (mmol/l). O ácido láctico é um produto indesejado do processo anaeróbico¹ (sem o uso do oxigênio) de obtenção de energia, também conhecido como fermentação.

Esta reação tem rápida resposta energética e é executada pelos músculos quando da incapacidade do sistema cardio-vascular de prover todo o oxigênio solicitado. Assim, quanto menor a taxa desse ácido no sangue, menor foi a necessidade do organismo de buscar fontes alternativas de energia, o que significa a existência de um sistema cardio-vascular mais bem preparado.

Porcentagem de VO_2 máximo

Mede o consumo de oxigênio em porcentagem de um valor máximo conhecido próprio do indivíduo, mensurado em mililitros de oxigênio por quilograma corporal por minuto (ml/kg.min). Dado que o VO_2 máximo se dá numa situação de solicitação extrema do organismo, a porcentagem desse valor pode nos indicar a intensidade do exercício do ponto de vista do atleta.



Fig. 5 - Bill Pownders durante teste de VO_2 máximo no Alabama Institute of Medicine

Taxa de batimentos cardíacos

Mede a quantidade de ciclos de bombeamento de sangue efetuados por unidade de tempo, grandeza mais comumente descrita em batimentos por minuto (bpm).

A taxa de renovação de sangue que cada músculo ou tecido em geral está solicitando ao coração tem a ver com a intensidade com que estes componentes estão sendo solicitados e refletem na velocidade de bombeamento do coração. Assim, se para uma mesma atividade – salvo as diferenças etárias, que têm grande influência sobre os bpm – o número de batimentos de um dado atleta seja inferior aos dos demais, é bem provável que seu preparo físico seja superior.

1. A **respiração anaeróbica**: a obtenção de energia do corpo humano, em situações normais, é feita de forma aeróbica, que é o aproveitamento da energia contida na glicose a partir de sua combinação com o oxigênio. Em momentos de grande esforço, as células musculares não conseguem suprir toda a energia necessária através da respiração aeróbica (por falta de oxigênio) e buscam a respiração anaeróbica de açúcares (fermentação e láctea) como alternativa para suprir esse déficit. A respiração anaeróbica tem, no entanto, um saldo de energia de 2 ATP por ciclo, contra 38 da aeróbica. A fermentação, além de subaproveitar o potencial energético da glicose, gera como resíduo o ácido láctico, que causa dores musculares, prejudicando a atividade física, ou até mesmo a impossibilita, quando o acúmulo é tão grande a ponto de causar câibras.

A correlação entre os parâmetros biomédicos

Não seria correto afirmar que um ou outro parâmetro é o melhor para se ter uma ótima avaliação da intensidade do esforço físico ou de como o atleta estaria suportando tal atividade. O que a literatura especializada usualmente recomenda é a avaliação cruzada desses

parâmetros, uma vez que eles são únicos e insubstituíveis.

No caso do problema em questão, onde a atividade é o ciclismo e a situação é a de treinos cotidianos ou até de uma competição, tornam-se incômodos - ou mesmo inviáveis - a execução de testes de natureza laboratorial, como é o caso do índice de lactato que, mesmo quando feito em



Fig. 6 - Coleta de amostra sanguínea e aparelhagem usada no teste de lactato

campo, exige a parada da atividade para a coleta de amostra sanguínea, ou da porcentagem de VO_2 máximo, carente de complicada e incômoda aparelhagem acoplada às vias aéreas do atleta.

Uma preferência inicial passa, portanto, a ser dada aos bpm como parâmetro biomédico de controle da atividade. Não apenas pela facilidade da sua obtenção em campo e em tempo real - pela simples contagem da dilatação arterial ou por sensores elétricos,

difundidos em aparelhos ergométricos de academias - mas pela existência de estudos que correlacionem porcentagem da bpm máxima (obtida por vários métodos) com porcentagem do VO_2 máximo (Tabela 1) e com limites de lactato, como veremos a seguir.

Porcentagem da Frequência Cardíaca Máxima	Porcentagem do VO_2 Máximo
35	30
60	50
80	75
90	84
100	100

Tabela 1 - A correlação entre bpm e porcentagem de VO_2 máximo [3]

Zonas e limites de trabalho do coração

Limite basal: frequência cardíaca de repouso. É a mínima atingida pelo atleta;

Limite máximo: frequência cardíaca máxima suportável pelo atleta. Normalmente só alcançada em testes ou em finais de competições;

Zona de trabalho do coração: é aquela compreendida entre os limites basal e máximo;

Limiar de treinamento: mínima intensidade de atividade que resulte em

aumento da capacidade cardiovascular do indivíduo em executar um dado esporte;

Zona de atividade normal: é aquela compreendida entre a total inatividade (bpm basal ou de repouso) e o limiar de treinamento. Qualquer atividade dentro desta faixa é vista como normal pelo organismo e não lhe acrescenta preparo atlético;

Limiar anaeróbico: intensidade máxima que o atleta suporta sem que seu organismo passe a buscar a fermentação como fonte alternativa de energia. A princípio, se mantido abaixo deste limite, o treinamento será o mais longo possível sem a inconveniência das câibras ao atleta, que são causadas em grande parte, pelo acúmulo de ácido láctico nos músculos;

Zona de treinamento aeróbico: é aquela compreendida acima do limiar de treinamento e abaixo do limiar anaeróbico do atleta;

Limite de treinamento: intensidade máxima de atividade conveniente ao atleta;

Zona de treinamento anaeróbico: é aquela compreendida entre o limiar anaeróbico e o limite de treinamento. É trabalhada, em geral, por atletas em treino de força e em curtos intervalos de tempo;

Zona alvo de treinamento: varia com os propósitos do atleta, mas é pré-estimada como sendo aquela onde os bpm situem-se entre 60% (Limiar de treinamento) e 80% (Limite de treinamento) da zona de trabalho do coração;

Deste modo, além de um ótimo guia para controle da intensidade do exercício por si só, através do conceito de bpm de limiar anaeróbico é possível ainda se ter uma idéia comparativa entre frequência cardíaca e lactato.

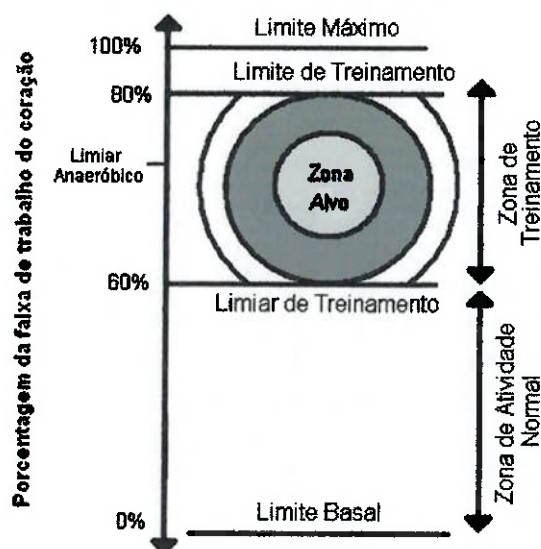


Fig. 7 - Zonas e limites de trabalho do coração [2]

Critérios de Julgamento

O julgamento da adequação ou não de uma determinada marcha a uma dada situação deve ser feita segundo critérios necessários e suficientes para tal. Considerou-se como adequados o conjunto de critérios a seguir:

A Finalidade do Treino:

A finalidade do treino implica na definição da intensidade e maneira com que o atleta será solicitado. Essa definição implica em impor limites a serem respeitos nos parâmetros monitorados selecionados .

O Estado do Conjunto Homem-Bicicleta:

É necessário o constante monitoramento das condições do atleta para a comparação com os limites supra-citados e garantia que os mesmos estão sendo respeitados.

A Solicitação do Ambiente:

As características do ambiente variam constantemente ao longo da atividade, influenciando o nível de esforço requerido e consequentemente no estado do conjunto homem-bicicleta.

A Intenção do Atleta:

Tão importante quanto o respeito aos limites impostos (finalidade do treino) é uma interpretação adequada da vontade instantânea do atleta.

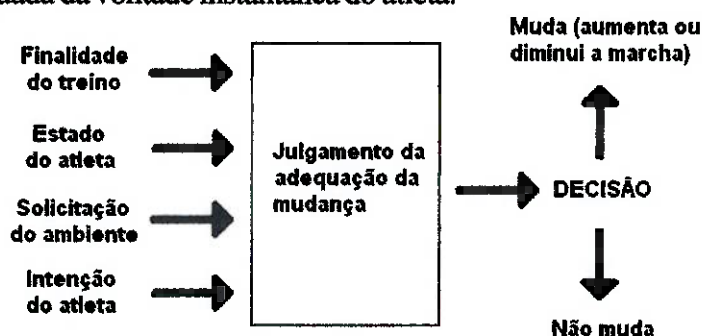


Fig. 8 - Representação esquemática dos critérios de julgamento de adequação da marcha a dada situação

Variáveis de interesse

Para a avaliação da situação do sistema segundo a ótica de cada um dos critérios supra-citados, é necessária a definição de variáveis adequadas, que representem o estado do sistema de maneira eficiente. A partir dessa ideologia, citar-se-ão as variáveis notáveis de importância do nosso sistema e os motivos pelos quais elas devem ou não ser eleitas as variáveis do mesmo.

Variáveis de entrada:

Finalidade do treino: Os treinamentos visam manter um certo parâmetro do sistema dentro de certos limites. Treinamentos formais, de caráter competitivo, costumam priorizar a manutenção da rotação e/ou velocidade dentro de uma faixa de trabalho, às vezes restringindo a utilização de marchas a uma gama limitada. Programas de treinamento mais informais, praticado por pessoas que visam um simples aprimoramento da forma física, são mais eficientes ao restringir o batimento a uma determinada faixa próxima ao limiar anaeróbico da pessoa. Define-se então quatro limites relacionados a cada uma das variáveis monitoradas: limites inferiores e superiores para rotação e batimento (L_{min} , L_{max} , R_{min} , R_{max}). Ao se exceder algum desses limites dados a pessoa deve procurar a alteração da relação de transmissão para levar esses parâmetros de volta à faixa de trabalho desejada.

Estado momentâneo do conjunto homem-bicicleta: Além de servir como um limite a ser respeitado, a frequência com que o coração do indivíduo bombeia o sangue pelo seu organismo serve ainda, como descrito anteriormente, como um ótimo indicador do estado momentâneo desse atleta, sendo muito mais facilmente monitorável do que parâmetros como VO_2 e lactato, de natureza laboratorial. Outro parâmetro importante de comparação seria a rotação do pedal.

Solicitação que o ambiente impõe ao atleta: são variáveis de grande influência aquelas relacionadas às perdas mecânicas, tais como qualidade do piso e velocidade do vento e aquela relacionada à aceleração da gravidade, ou seja, a inclinação do terreno.

Um fato interessante – e conveniente – é a constatação de que esses agentes dificultantes ou facilitadores do exercício se refletem numa flutuação da frequência cardíaca do atleta e na velocidade do conjunto homem-bicicleta em relação ao solo, o que nos faz considerar mais atraente uma análise que não leve em conta cada uma dessas características do ambiente ou da bicicleta, mas sim análise da influência dessas variações ambientais numa grandeza já vista como monitorável, que é a frequência cardíaca.

A solicitação do ambiente também tem influência sobre a rotação que o ciclista é capaz de imprimir aos pedais.

Fica, portanto, notória a conveniência da definição dos **BPM (batimentos por minuto)** do coração do atleta e da **rotação do pedal rpm** (rotações por minuto) como variáveis de entrada do nosso aparato, seja na análise contínua das condições do atleta e do ambiente, seja na definição dos limites de operação do conjunto.

Intenção do atleta: Ora, essa pode ser avaliada segundo a variação que o indivíduo tenta impor ao movimento do conjunto por meio das suas pernas atuando nos pedais, ou seja, analisando-se se a frequência das pedaladas está aumentando ou diminuindo, o que é chamado de cadência das pedaladas.

Torna-se portanto, também conveniente a definição da derivada da rotação do pedal, drpm/dt (rad/s^2) ou seja, sua velocidade angular, num tratamento interno do aparato.

Robustez: Com propósitos de monitoramento e manutenção da robustez do aparato administrador da relação de transmissão, a entrada **Velocidade** deverá ser também adquirida, representando a velocidade da bicicleta em relação ao solo e sendo medida a partir da frequência de rotação das rodas da mesma. Isso porque nas situações em que há de fato transmissão de potência (tração na corrente), parâmetros a relação de transmissão, **RPM** e **Velocidade** estão inter-relacionados, sendo possível defini-los a partir de apenas dois deles. No entanto, a garantia da robustez do sistema só pode ser alcançada a partir do estudo individual de cada um desses parâmetros, pois há casos em que não existe tração na corrente e conseqüentemente essa inter-relação não se verifica (numa descida com os pedais parados, por exemplo).

Variável de saída:

Tendo sido feita essa síntese das flutuações do sistema através das variáveis de entrada definidas acima, o controle da maneira com que se desenvolve o esforço atlético passa a ser função da relação de transmissão imposta pelo câmbio da bicicleta, quantificado por uma grandeza inteira **k**, que pode ser simplesmente referenciada como **marcha** e constitui nossa variável de saída.

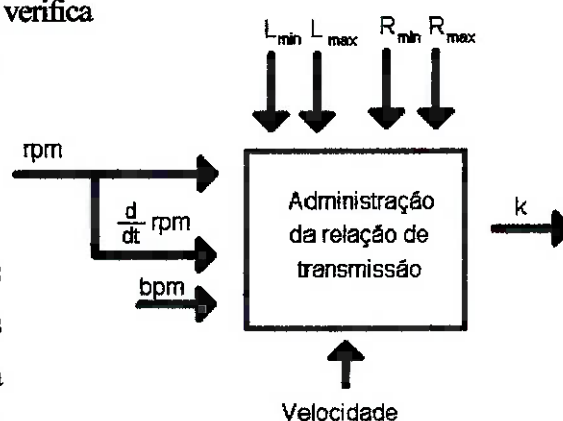


Fig. 9 - Diagrama esquemático das entradas e saídas do sistema

Equacionamento do problema

O esforço de se equacionar o problema deve ser encarado não como um ponto de partida para a modelagem do controle, tendo em vista que não se trata de um sistema contínuo. Deve, isto sim, servir de base para se avaliar o comportamento do sistema fisicamente, isto é, qual o comportamento esperado ao se alterar a relação de transmissão, isto é, descobrir quais variáveis de estado são afetadas pela mudança de uma marcha e qual a natureza dessa mudança.

Sendo os parâmetros utilizados no equacionamento do problema:

- A velocidade angular do pedal (ω [rad/s]),
- **Intenção do atleta:** representado pela derivada da velocidade angular do pedal ($d\omega/dt$ [rad/s²]), a aceleração angular, que indica se quer se ir mais rápido ou mais devagar
- **Finalidade do treino:** limite imposto ao ciclista - seu limiar anaeróbico (L [bpm]) e rotação máxima do pedal R [rpm];
- **Solicitação do ambiente:** é definida pela inclinação da pista (θ) e pela velocidade em relação ao ar (V_{ar} [m/s]).
- **Estado do atleta:** a frequência cardíaca do ciclista (**bpm** [bpm]).

O operador tem controle direto (voluntário) sobre ω e $d\omega/dt$ (ele as impõe ao sistema), que são as entradas. L e R são restrições do software. θ e V_{ar} são parâmetros impostos pelo ambiente e definem a força externa que o ciclista tem que vencer. A pergunta básica que determina o objetivo do equacionamento (e do software, como será visto posteriormente) é: *o que o ciclista quer? Ele quer, ao pedalar, maximizar a velocidade sem extrapolar dados limites de esforço.*

Posto isto, segue o equacionamento do problema, que será útil para modelar o comportamento do software otimizador de esforço. Definem-se:

Força externa: $F_{ext} = f(q, V_{ar})$

Relação de transmissão da marcha: k

Força imprimida pelo ciclista: $F_{ciclista} = F_c(F_{ext}, k)$

Velocidade da bicicleta: $v_{bicicleta} = v(\omega, k)$

Para a adequação do equacionamento ao SI, a variável RPM é chamada de ω [rad/s], da mesma forma que sua derivada $dRPM/dt$, que será chamada $d\omega/dt$ [rad/s²].

Sendo ω_{roda} e ω_{pedal} as rotações da roda e do pedal e R o raio da roda:

$$\omega_{roda} = k \cdot \omega_{pedal} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow v = \omega_{roda} \cdot R_{roda} = R_{roda} \cdot \omega_{pedal} \cdot k$$

Uma relação entre as grandezas pode ser obtida da análise da potência despendida. Sendo a potência fornecida pelo ciclista, onde b é o braço do pedal e a potência desenvolvida pela bicicleta. Considerando-se um rendimento η , então:

$$\begin{cases} P_{bike} = F_{ext} \cdot v \\ P_{ciclista} = \omega_{pedal} \cdot F_c \cdot b \end{cases}$$

$$P_{bike} = \eta \cdot P_{ciclista}$$

$$F_{ext} \cdot v = \eta \cdot \omega_{pedal} \cdot F_c \cdot b$$

$$\therefore F_c = \frac{R}{\eta \cdot b} \cdot F_{ext} \cdot k = A \cdot F_{ext} \cdot k$$

Conclui-se que:

$$\begin{cases} v = k \cdot R \cdot \omega_{pedal} \\ F_c = k \cdot A \cdot F_{ext} \end{cases}$$

Portanto, o aumento da relação de transmissão k_{Nm} implica simultaneamente no aumento da força imprimida pelo ciclista e na velocidade. O ciclista, a cada momento, deve determinar a marcha que tenha a relação de transmissão que possibilite a maior velocidade possível sem exceder uma força máxima tolerável pelo organismo.

Como as forças externas se refletem na frequência cardíaca do ciclista, então, a frequência cardíaca é uma maneira indireta de determinação dessa força.

A lógica de decisão é, portanto, a escolha da marcha que tenha a relação de transmissão que possibilite a maior velocidade possível sem exceder uma frequência máxima tolerável pelo organismo.

Discussão sobre batimento cardíaco e rotação do pedal como parâmetros de desempenho no ciclismo

A seguir, serão feitas algumas considerações sobre a adequação do uso da taxa de batimentos cardíacos como parâmetro de escolha da marcha a ser utilizada durante a atividade ciclística, abordando temas como o comportamento dessa entrada no decorrer do tempo em função das variáveis externas e daquelas intrínsecas ao organismo humano.

Será feita também uma análise do treino tal qual usualmente se executa, baseado numa gama de marchas utilizáveis juntamente a uma cadência alvo a ser mantida.

Durante um treino ciclístico, os batimentos cardíacos variam de maneira mais freqüente e ampla do que noutras atividades aeróbicas, como a corrida e a natação por exemplo. Isso ocorre por conta da suscetibilidade do conjunto homem-bicicleta às variáveis mais diversas possíveis, dentre as quais podem-se destacar: a rugosidade do solo; o vento - que varia muito de intensidade, direção e uniformidade; a própria relação de rodas dentadas do sistema de transmissão e; a inclinação do terreno;

Assim, se considerar-se o fato de que um treino ciclístico sério não dura menos de uma hora e meia – salvo em condições de treino de “tiros”, caracterizados esses sim, por uma curta distância e uma alta intensidade, mas que nos quais não se aplica a idéia de não se ultrapassar o limite aeróbico – e que a velocidade média é facilmente superior a trinta quilômetros por hora, concluir-se-á que uma grande distância é sempre percorrida – com eventuais morros, trocas de asfalto, variações de rumo e de marcha - fazendo com que as características supracitadas de fato variem muito ao longo dum mesmo treino.

Como ilustração, tomemos o caso de um ciclista que entra numa subida após um trecho plano: se este vinha desenvolvendo um esforço dentro daquela faixa de treinamento, seu batimento certamente se elevará, caracterizando-se um período de adaptação que pode durar até alguns minutos. Nesse meio tempo, o limite aeróbico pode ser ultrapassado, em detrimento do rendimento muscular futuro mas, de qualquer forma, caso se tenha uma opção por se diminuir o ritmo em função do aclave que se apresentou, uma nova situação de equilíbrio se estabelecerá, e num patamar definido em grande parte pela marcha escolhida pelo atleta.

Da mesma maneira podem-se entender todas as mudanças de solicitação atlética impostas pelo ambiente, que gerarão um pico de batimentos e, se dentro da capacidade do indivíduo, um novo patamar de batimento.

Passando-se para o caso real, as considerações a serem feitas seriam referentes ao fato de que, na maioria das vezes, esses “ciclos de adaptação” do organismo se sobrepõem, seja por um terreno muito acidentado, onde pequenos aclives e declives se associam constantemente, seja por uma ventania no meio duma subida, ou seja ainda pelo fato de que a resposta de queda de batimento numa descida não se dá da mesma forma que seu aumento durante uma descida.

Concomitantemente a essa babilônia de estímulos, tem-se o fator cansaço – e esse se apresenta em toda atividade aeróbica – que faz com que o coração vá aumentando gradualmente o seu ritmo médio conforme as funções celulares se tornam mais custosas, principalmente pela saturação com toxinas e pela redução das fontes energéticas do organismo.

Ocorre que não é viável nem um número de trocas de marcha tão grande por parte do atleta, tampouco que este indivíduo, já ocupado com o esforço atlético em si – que é sua função primária – com a pilotagem da bicicleta e com a periodização de sua hidratação e nutrição, consiga avaliar o momento e o modo exatos de efetuar tais trocas, mesmo porque, esse conhecimento é algo característico dos ciclistas mais experientes, consistindo-se numa característica ímpar de alguns campeões.

É justamente por isso que o treino usual se baliza por uma ou algumas opções de marchas a serem usadas e por uma cadência a ser mantida ao se pedalar. Logicamente, com uma relação de transmissão e uma rpm do pedal definidas, está também determinada uma velocidade que, em qualquer situação de terreno ou de vento, por exemplo, deve ser mantida, ainda que isso cause um desgaste demasiado do ciclista. O que se faz muitas vezes para evitá-lo é determinar um batimento máximo que, uma vez alcançado, sirva de sinal para a diminuição da rpm ou da marcha. No entanto, é comum no meio atlético que se ignore esse aviso corpóreo e se mantenha o nível de esforço, sendo isso feito principalmente em prol da manutenção da velocidade.

Note-se que, mesmo quando observado esse limite, já houve o desgaste, pois o caráter desse controle humano é sempre posterior ao evento, havendo sempre períodos de desgaste que, ainda que mínimos, podem se acumular, causando a fadiga em situações de

treinos longos. Começa-se então a se delinear uma das vantagens do controle automático do sistema, tema do próximo capítulo, pois um sistema de controle bem projetado seria capaz de evitar esse inconveniente, “prevendo” segundo a comparação com casos anteriores, quando é o momento de se trocar a marcha.

Esse controle preventivo seria reduziria a marcha não apenas quando o limite aeróbico fosse extrapolado, mas quando se ultrapassasse já o limite de treinamento. Nesse caso, para não se prejudicar muito o rendimento, – subutilizar-se o potencial atlético - caso o atleta demonstrasse ainda vigor e vontade de aumentar a rotação do pedal, poderia ser tentado esse aumento de marcha de uma forma ou de outra e, caso o limite aeróbico fosse de fato atingido, ignorar-se-ia então essa intenção do indivíduo, pois já estaria experimentado que, naquele momento, este não estaria apto a desenvolver tal potência sem se prejudicar.

O controle do sistema

Motivação

O conjunto homem-bicicleta possui não possui um comportamento aleatório. Ele possui padrões que podem ser sintetizados em leis gerais que o regem. A parte humana do conjunto tem controle direto sobre a relação de transmissão, pela escolha da marcha, e da rotação imposta aos pedais, parâmetros a partir dos quais se estabelece a velocidade da bicicleta. O meio impõe ao sistema diferentes condições que se refletem nos batimentos cardíacos do atleta. O atleta controla seus batimentos - resposta de seu organismo ao meio - através da mudança da relação de transmissão, diretamente proporcional à força exercida pelo ciclista sob uma força externa constante, já que a força exercida pelo ciclista é, por sua vez, proporcional a seus batimentos. Como visto no equacionamento do problema, o aumento da relação de transmissão aumenta simultaneamente a velocidade e a força exercida pelo ciclista, mantidas rotação e força externa, constituindo o problema maior do ciclista encontrar o ponto de equilíbrio entre ambos, isto é, a maior velocidade dentro de um limite de esforço.

Se o ciclista controla seu esforço a partir da consideração de duas variáveis, rotação e batimentos, e da escolha do estado discreto - a marcha - mais indicado para a situação, e sendo essas variáveis sensoriáveis, porque não deixar a escolha desse estado discreto a cargo de um sistema automático que funcione como o controle humano direto? Ou seja, que “pense” como o ciclista pensa?

E que além disso, como uma vantagem adicional, seja capaz de avaliar a consequência da mudança antes mesmo que ela seja feita, através da elaboração de um modelo matemático que relacione as variáveis do sistema de forma qualitativa e quantitativa. Esse sistema poderia tomar então, teoricamente, decisões melhores que aquelas tomadas por um ciclista ordinário, pois suas decisões não seriam baseadas em um “achismo” subjetivo, mas sim em um modelo lógico nebuloso, que soubesse *a priori* de forma objetiva os efeitos da mudança, baseado em um algoritmo empírico, que avaliasse o comportamento padrão dos ciclistas em geral e do usuário em particular.

Considerações Iniciais

Para determinar a marcha mais adequada a cada situação, o sistema deve avaliar a cada instante se a marcha é coerente às condições encontradas. Como já visto, o sistema possui duas entradas, provenientes dos sensores: a leitura da frequência cardíaca do atleta, representada seu bpm e a leitura da rotação do pedal. Desse último, estamos interessados também em sua derivada, que representa a intenção do atleta. A derivada da rotação determina o que chamaremos de cadência. Um aumento da cadência representa uma intenção de aceleração, enquanto uma diminuição dessa cadência representa uma intenção de desaceleração. A saída do sistema é uma indicação da marcha ideal para a ocasião baseada nos parâmetros de entrada lidos.

Essas entradas são tratadas pelo sistema a partir dos critérios de julgamento explicitados anteriormente. São eles: finalidade do treinamento, estado do atleta, solicitação do ambiente e intenção do atleta. Viu-se que a solicitação do ambiente se reflete no estado do atleta de maneira diretamente proporcional, pois sendo o estado do atleta avaliado por seus batimentos, e sendo o resultado de uma variação da solicitação do ambiente (variação na inclinação, da intensidade do vento, da qualidade do piso, etc.) uma variação proporcional nos batimentos do atleta, conclui-se que a solicitação do ambiente e o estado do atleta um critério de julgamento único. O estado do conjunto é avaliado também pela rotação imprimida pelo atleta ao pedal, e as condições externas e pessoais também influem nesse parâmetro.

As entradas, para serem úteis como parâmetros de controle, devem ser comparadas com determinados limites. Esses limites seriam valores específicos que constituem faixas nas quais esses parâmetros devem ser mantidos. Dependendo-se do tipo de treinamento desejado deve-se priorizar um ou outro parâmetro (batimento ou rotação).

Pode-se definir dois tipos de treinamento. Treinamentos formais, que visam a preparação de atletas para competições, costuma utilizar como parâmetro de controle a

rotação. Treinamentos informais, que visam uma melhora nas condições aeróbicas do praticante, são mais eficientes quando se utiliza os batimentos como parâmetro de controle.

Como ressaltado anteriormente, é também importante que o sistema seja capaz de interpretar a intenção imediata do praticante, efetuando mudanças de marcha ao se aumentar ou diminuir a cadência de rotação dos pedais, o que é monitorado pela derivada da velocidade angular do pedal.

Conclui-se então que o sistema funciona basicamente da seguinte maneira: adquirindo a leitura do sensor dos batimentos, do sensor de rotação e da derivada da leitura do sensor de rotação (que representa a intenção do atleta), ele compara essas três leituras com parâmetros pré-estabelecidos de comparação para a avaliação da adequação da marcha atual à situação presente, priorizando um desses parâmetros como o mais relevante, conforme desejado pelo usuário.

Os tipos de controle do sistema

Existem duas variáveis monitoradas que servem de base para o estabelecimento da marcha ótima ao sistema a cada instante: rotação do pedal e batimentos cardíacos do ciclista. Uma simplificação do problema nos indica quatro casos gerais onde o ciclista padrão executa uma mudança de marcha, descritos a seguir. Uma elaboração mais detalhada do algoritmo de controle talvez fornecesse uma lógica mais intrincada e interrelacionada entre as duas variáveis, e ainda do monitoramento da velocidade. Mas, a grosso modo, os quatro tipos de controle que regulam a atividade ciclística são a otimização do esforço, a verificação de sobre-esforço, a manutenção de uma rotação e a verificação de variação da cadência.

1) Otimização do esforço: O primeiro tipo de controle é baseado na otimização do esforço do ciclista, isto é, a verificação de se esse esforço não está sendo subaproveitado e, em caso afirmativo, colocar o sistema em um estado que aproveite melhor seu esforço. O subaproveitamento do esforço se caracteriza por um batimento abaixo da zona de treinamento. Nessa situação, o ciclista está desenvolvendo uma velocidade abaixo da qual poderia estar desenvolvendo sem que excedesse seu limiar aeróbico. O sistema de controle deve buscar um aumento progressivo de marchas até que o batimento do atleta atinja a zona de treinamento. Obtém-se um aumento progressivo da velocidade e dos batimentos com uma mesma rotação.

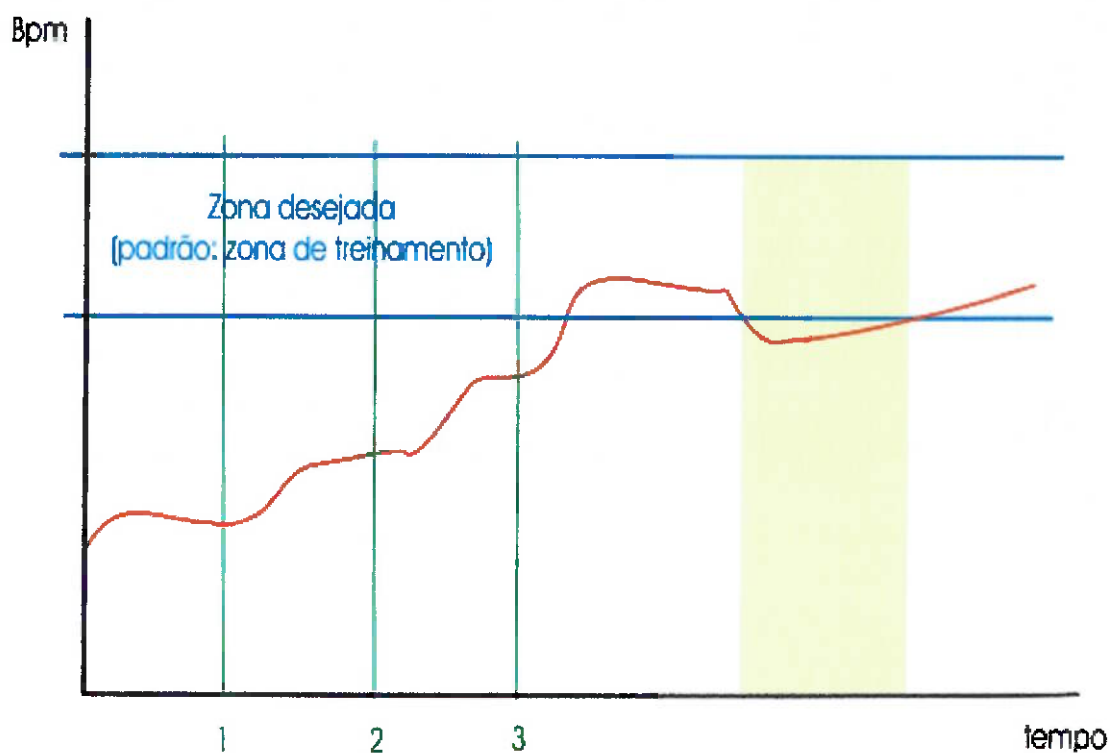


Figura 10 - Gráfico ilustrativo da resposta dos batimentos sob a ação do controle baseado na otimização de esforço

Nos pontos 1, 2 e 3 ocorre mudança de marcha. O sistema alcança a zona pretendida de atuação e então volta a cair para abaixo dela (área amarela do gráfico), situação na qual o sistema passa a cogitar uma nova mudança de marcha. Com o retorno à zona desejada antes que a mudança fosse efetuada, a marcha não é trocada.

2) Verificação de sobre-esforço: O segundotipo de controle é baseado na verificação de se o esforço realizado pelo atleta está sendo excessivo, e em caso afirmativo colocar o sistema em um estado mais adequado. O esforço excessivo se caracteriza por um batimento acima da zona de treinamento, situação na qual há grande produção de ácido láctico e que normalmente é indesejada. Nesse caso, o sistema deve diminuir progressivamente a relação de transmissão até que os batimentos retornem à zona de treinamento.

Essa diminuição de marchas, no entanto, resulta em uma consequente diminuição da velocidade, e esse tipo de controle não é indicado quando o praticante deseja manter a velocidade propositalmente alta, mesmo às custas de um esforço excessivo.

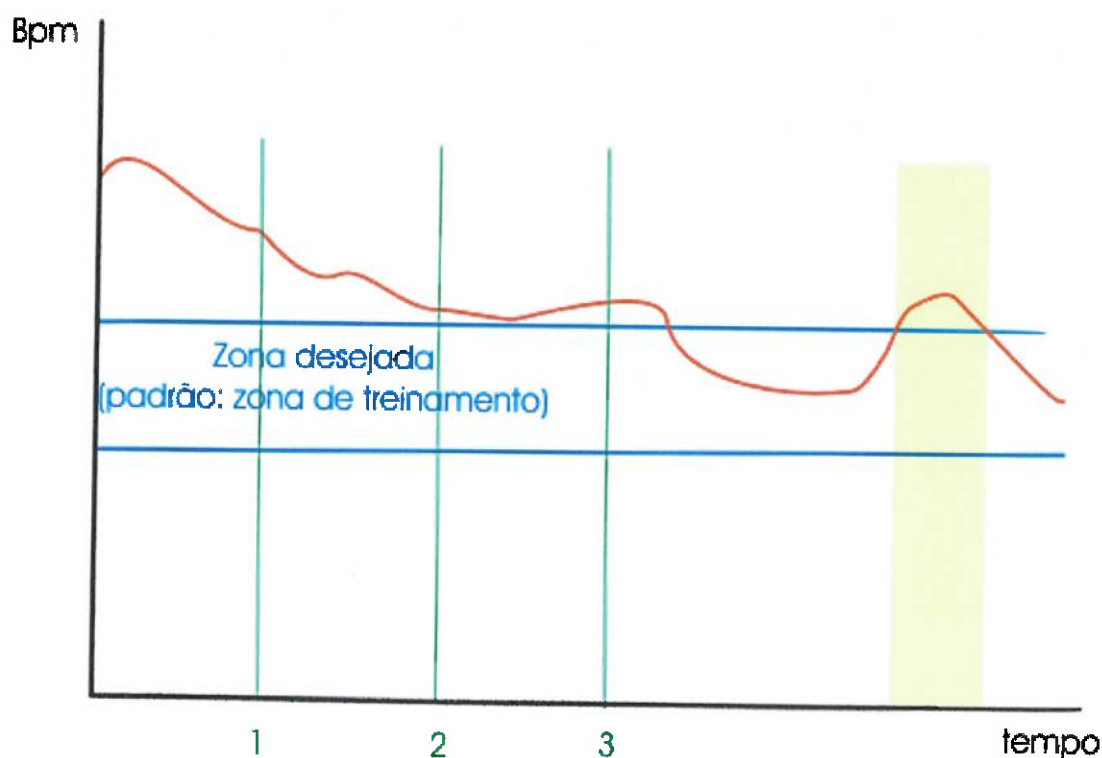


Figura 11- Gráfico ilustrativo da resposta dos batimentos sob a ação do controle baseado na verificação de sobre-esforço

No gráfico acima, há diminuição de marcha em 1, 2 e 3. Na área destacada em amarelo, o tempo durante o qual o sistema esteve acima da zona desejada foi insuficiente para a verificação da necessidade de mudança.

3) Manutenção da rotação: Ligada à rotação do pedal, esse tipo de controle visa à manutenção da rotação dentro de uma faixa pré-estabelecida. Apesar de não ser uma funcionalidade útil para o usuário comum, para os quais um controle com base em batimentos é mais interessante, ela é necessária em situações de treinamento de alto nível. Nesses treinamentos, o objetivo do ciclista é manter a rotação dos pedais constante, não importando a situação que se apresente.

Uma diminuição na cadência nessa situação representa que o ciclista não está agüentando a marcha atual e deseja uma diminuição na marcha para poder retomar a rotação desejada, enquanto um aumento na rotação significa que o atleta tem a condição de passar para uma marcha mais elevada, na qual ele possa obter uma velocidade maior.

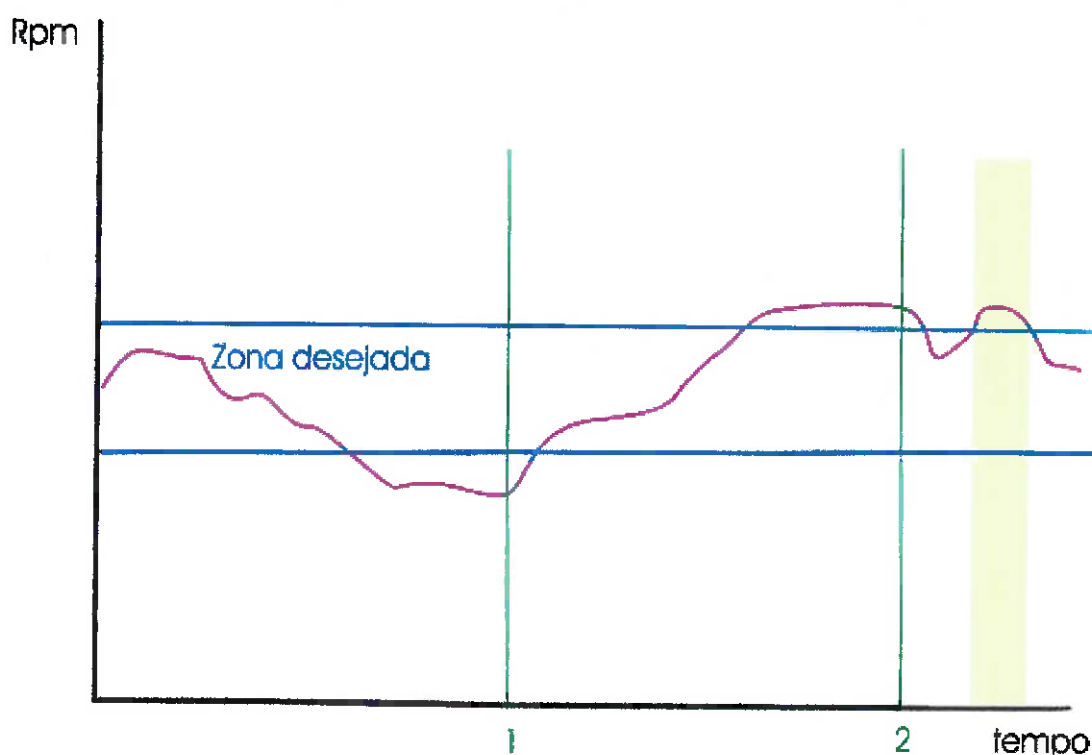
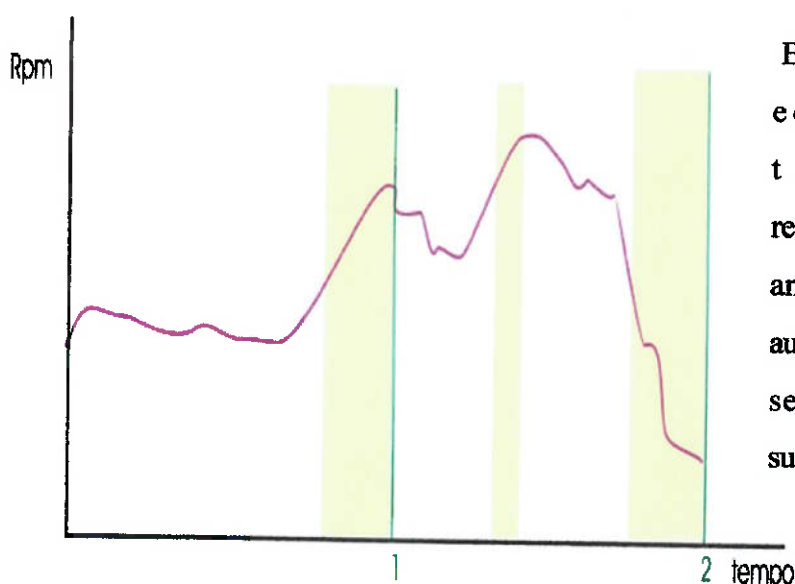


Figura 12 - Gráfico ilustrativo da resposta da rotação sob a ação do controle baseado na manutenção da rotação

No gráfico acima, a marcha é diminuída em 1, pois o ciclista não conseguia manter a rotação desejada e em 2 ela é aumentada, pois é verificado que o ciclista excedeu a rotação limite e poderia aproveitar melhor seu desempenho com um aumento da relação de transmissão. Na área amarela, o tempo foi insuficiente para ocorrer a mudança.

4) Verificação de variação de cadência: Esse tipo de controle é baseado na avaliação da cadência. Ele leva em consideração a intenção do atleta. Em geral, um ciclista que aumenta sua cadência deseja com isso um aumento na sua velocidade, e um aumento progressivo da cadência sugere que o ciclista deseja ir mais rápido e que está prestes a efetuar uma mudança de marcha. Claro que nem todo aumento de cadência está ligado a um desejo desse tipo, mas um aumento contínuo da cadência sim. Deve existir um tempo de avaliação para a verificação de se essa tendência de aumento da cadência se confirma. Em caso afirmativo, o aumentos da relação de transmissão devem ser efetuados até que o ciclista retome uma cadência constante. Uma diminuição progressiva da cadência é interpretada de maneira análoga, mas oposta. Ou seja, representa uma intenção de diminuição de marcha.

Esse tipo de controle em muito se assemelha ao anterior, dele diferindo pelo fato de que enquanto o controle pela manutenção da rotação procura manter a rotação dentro de uma faixa fixa definida pelo usuário, o controle de cadência varia essa faixa de rotação permitida em tempo real, de modo que ela represente uma faixa da média recente do valor da rotação do sistema. Ela é, portanto, um controle de rotação constante no qual o próprio sistema em tempo real, e não o usuário, define os limites inferior e superior de comparação.



Em 1 e 2, ocorrem aumento e diminuição da relação de transmissão, respectivamente. Nas áreas amarelas, a tendência de aumento ou diminuição não se manteve por tempo suficiente para a intenção de mudança ter sido detectada, e por isso nada ocorre.

Figura 13 - Gráfico ilustrativo da resposta dos batimentos sob a ação do controle baseado na verificação de variação de cadência

5) Atuação direta do usuário: Independente dos sensores, se baseia na mudança solicitada por botões. Trata-se de um controle direto, ou seja, o ciclista tem a seu dispor dois botões que permitem o aumento e a diminuição da marcha, e ao apertá-los, o sistema efetua a mudança automaticamente. Deve estar sempre ativo no sistema

Conclui-se disso que o sistema possui três faixas fundamentais de comparação: a zona de treinamento, a faixa de rotação-alvo e a faixa de rotação média. A zona de treinamento é definida como uma zona que tem como centro o limite aeróbico e é parâmetro das tipos de controle 1 e 2. A rotação-alvo pode ser constante (tipo de controle 3) ou variável (tipo de controle 4). Deve-se verificar, contudo, as situações nas quais cada tipo de controle é desejável ou necessária e o usuário deve poder escolher qual(is) o tipo(s) de controle que ele quer que seja ativo no sistema em um dado momento.

Descrição do sistema de controle

O sistema homem-bicicleta pode ser encarado como um sistemas de eventos discretos, e na verdade deve assim ser encarado para a elaboração de uma lógica de controle eficiente. Isso porque o objeto de controle - o câmbio - possui um número finito e discreto de estados - as marchas.

O possível desenvolvimento futuro de um câmbio contínuo para bicicletas, ou seja, que permita variar sua relação de transmissão de modo contínuo, tornaria necessário a elaboração de uma lógica de controle de SVC (Sistema de Variáveis Contínuas), onde a relação de transmissão variasse de modo contínuo e extremamente preciso de acordo com as leituras provindas dos sensores de batimentos e rotação. A principal vantagem de um câmbio desse tipo seria a inexistência das transições bruscas que caracterizam o sistema discreto que existe nos dias atuais.

Um sistema de eventos discretos é composto pelos seguintes elementos:

- Dispositivo de Comando;
- Dispositivo de Monitoração;
- Dispositivo de Realização do Controle;
- Dispositivo de Atuação;
- Dispositivo de Detecção;
- Objeto de Controle (Sistema Homem-Bicicleta)

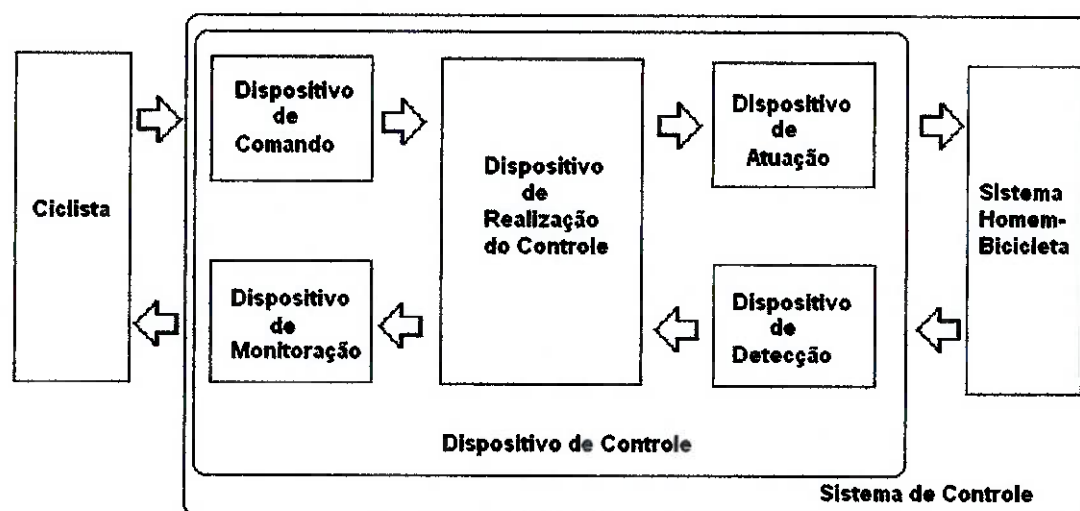


Figura 14 - Interrelação entre os diferentes dispositivos [8]

Para o desenvolvimento da lógica de controle desse sistema, devemos saber de antemão quais os elementos que constituem cada um dos elementos. Já sabemos que o dispositivo de detecção é composto por dois sensores - de rotação/velocidade e de batimentos - o primeiro acoplado à bicicleta e o segundo ao usuário. O dispositivo de atuação seriam os atuadores dos câmbios - traseiro e dianteiro.

Devemos, portanto, determinar nossos dispositivos de monitoração e de comando. Os dispositivos de comando seriam os botões disponíveis ao usuário pelos quais ele pode ligar/desligar ou acionar as opções que o sistema disponibiliza. Considerou-se necessário o seguinte conjunto de botões:

- Botão de mudança para cima - aumento manual da marcha;
- Botão de mudança para baixo - diminuição manual da marcha;
- Botão de Mudança de Modo - muda o modo de Manual para Automático e vice-versa;
- Botões de Tipo de Controle - Ativam/desativam cada um dos quatro tipos de controle disponíveis;
- Botão de Alteração de Parâmetros - permite que o usuário modifique os limites inferior e superior de rotação e batimentos, valores de referência das variáveis a partir dos quais as ações de controle são efetuadas.

Como dispositivos de monitoração, é importante o sistema possuir algum tipo de aviso -sonoro e/ou luminoso(LED)- que avise ao usuário que o dispositivo de atuação está ativado. Isto porque durante o tempo no qual a marcha é mudada, recomenda-se que o ciclista interrompa suas pedaladas.

No modo automático, quando um dos limites configurados for excedido, o sistema não deve realizar a mudança instantaneamente. Ele deve sim esperar para verificar se a tendência se mantém ou se o sistema retorna à condição de operação normal. Considerou-se interessante um aviso - luminoso (LED) - que informe ao usuário que o sistema está nessa fase de avaliação. Por último, o ciclista deve sempre ser mantido informado sobre a marcha atual do sistema e qual(is) o(s) tipo(s) de controle habilitados - informações que poderiam ser exibidas em um visor digital ou ainda por meio de LEDs.

Desenvolvimento da lógica de controle

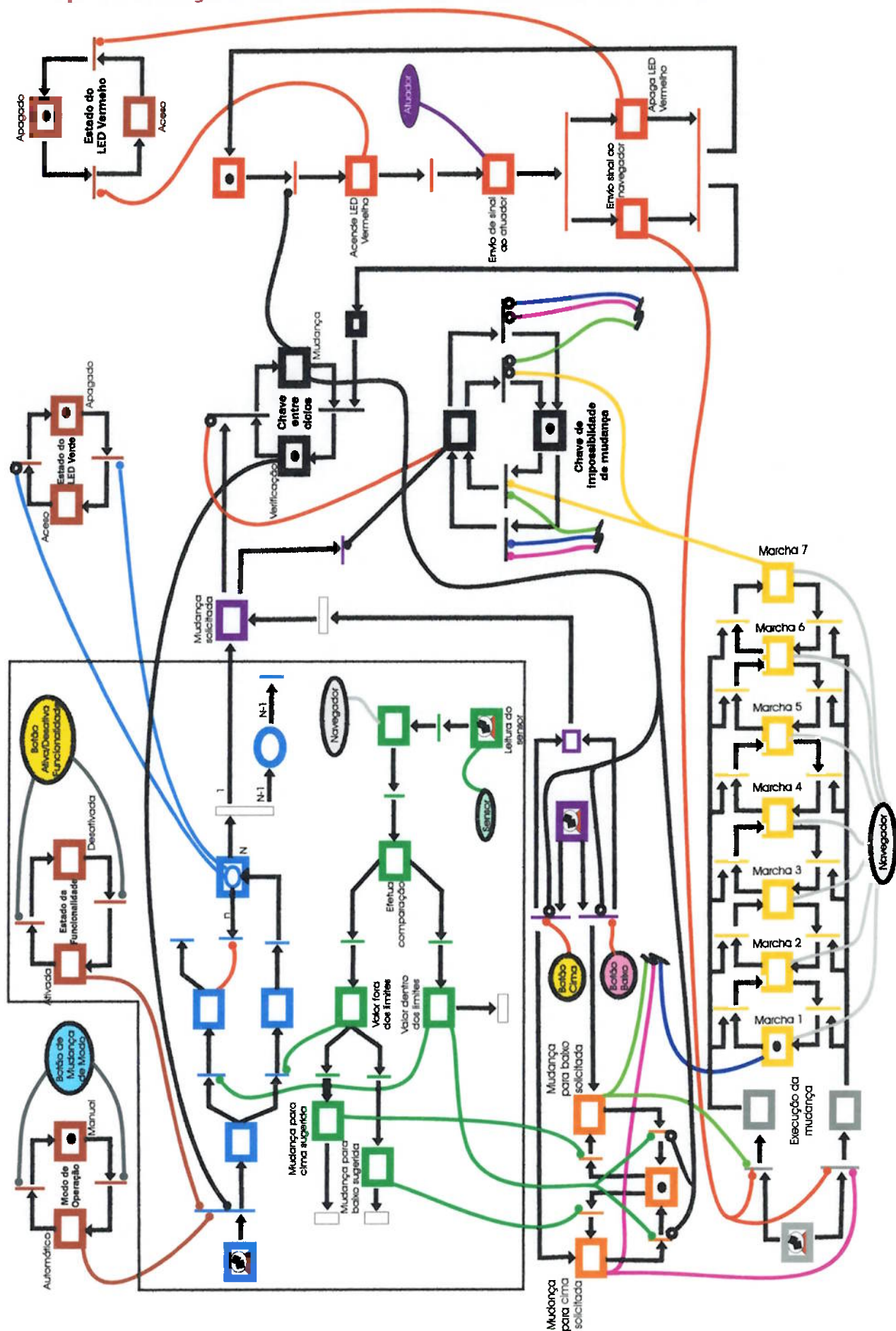
Definidos os elementos constituintes do nosso sistema de controle, pode-se iniciar a elaboração da lógica de controle associada. Antes de mais nada, é necessário a escolha de um método de desenvolvimento dessa lógica. Escolheu-se a técnica de modelagem conhecida como MFG, que é baseada numa interpretação do sistema de controle como um sistema condição-evento caracterizado por assincronismos, paralelismos, sequencialização, concorrência, etc.

Essa técnica permite uma modelagem de fácil interpretação e análise, o que torna simples a detecção e eliminação de problemas associados às redes de Petri, como colisões, “deadlocks” (configuração na qual o sistema “trava”). O Apêndice I consiste em uma explicação resumida sobre a interpretação de um diagrama MFG.

Primeiramente, o sistema foi dividido em alguns módulos, denominados “ciclos”: ciclo de verificação, ciclo de mudança, ciclo de sensoramento, além de ciclos auxiliares, relativos ao estado dos LEDs, aos modos do sistema (modo de operação Manual/Automático, tipos de controle habilitados) e um ciclo de status do sistema, que armazena a marcha atual do sistema, interligados aos dois tipos principais e que constituem intertravamentos destes. Existe além desses um dispositivo de chaveamento que não permite que novas solicitações de mudança sejam feitas enquanto o sistema se encontrar em seu ciclo de mudança, e que constitui um intertravamento importante do sistema.

A elaboração do MFG seguiu concomitantemente ao desenvolvimento de um programa em C que o simulasse, e a partir de uma análise conjunta, o MFG original foi sendo sucessivamente refinado e aprimorado, tendo em vista a eliminação de problemas apresentados, como “deadlocks” e invasões, e a determinação de todos os intertravamentos necessários ao funcionamento esperado do sistema. O MFG obtido se encontra na página seguinte.

Representação do Sistema de Controle em MFG



O software desenvolvido

O programa obtido em C, que simulava o MFG com perfeição, foi então transcrito para uma linguagem visual (Visual Basic), que permitia uma melhor visualização da dinâmica do sistema, de modo que as relações entre entradas e saídas fossem melhor visualizadas. Segue abaixo a tela principal do programa obtido, que será melhor explicado no capítulo seguinte.

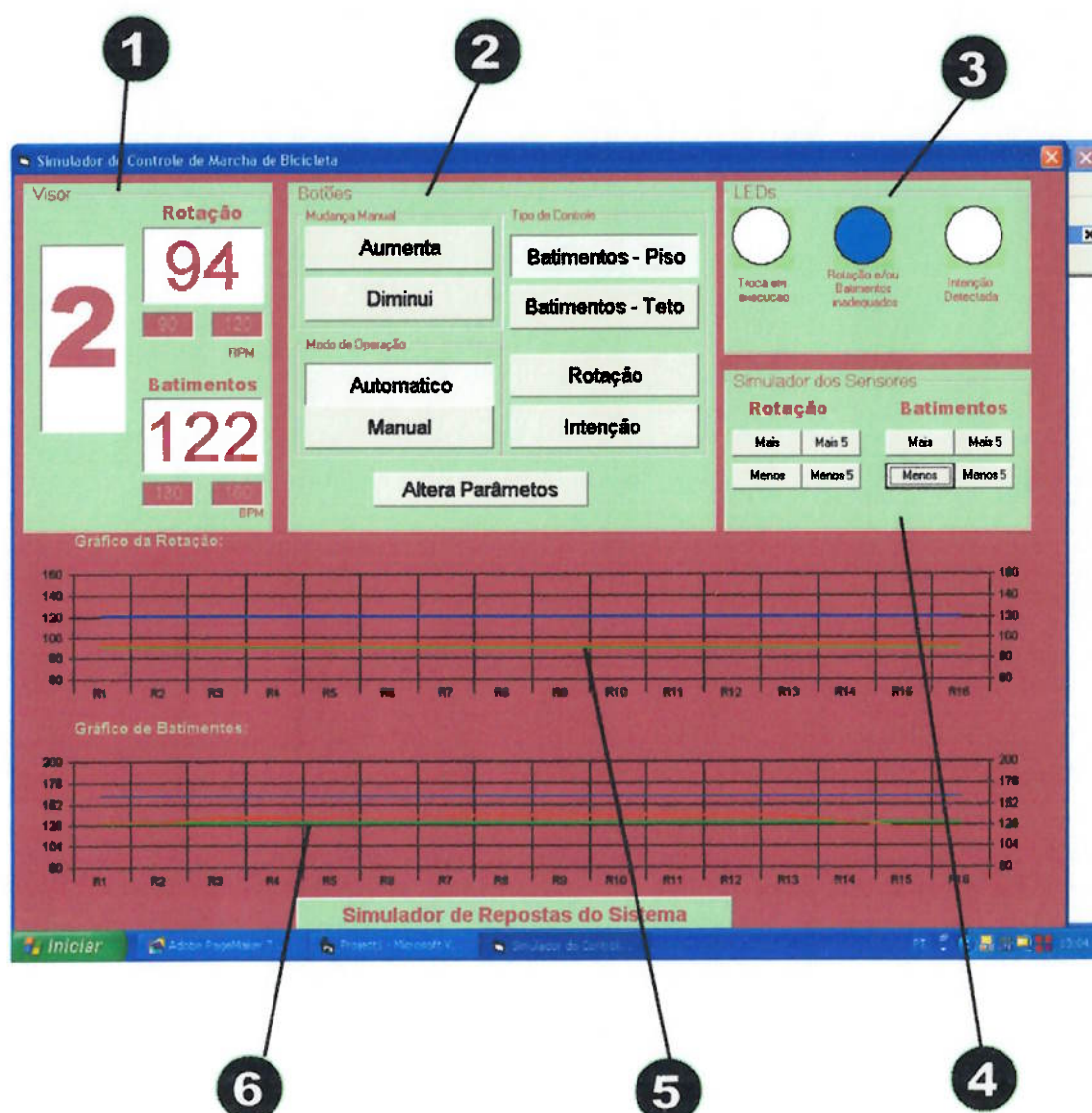


Figura 15 - Exemplo de tela do programa de simulação

Funcionamento do software

Explicaremos a seguir cada uma das seis subdivisões da tela do programa:

1) Simulador do Visor: simula o comportamento do dispositivo de monitoração (visor disponível ao usuário). Esse visor informa a marcha atual do sistema, o valor atual de rotação e batimentos (em RPM e BPM, respectivamente), atualizados em tempo real. Fornece também os valores limites desses dois parâmetros, valores a partir dos quais o sistema efetua as ações de controle.

2) Simulador da Botoeira: simula o comportamento do dispositivo de comando (botoeira). Contém todos os botões que o usuário tem ao seu dispor para configurar e efetuar um controle efetivo, eficiente e funcional do sistema. Além dos dois botões de mudança manual de marcha, oferece um botão de mudança de Modo (Manual/Automático) e quatro botões que ativam/desativam os quatro tipos de controle existentes e que foram denominados Batimentos-Piso, Batimentos-Teto, Rotação e Intenção. Esses botões só são disponíveis quando o sistema se encontra no modo Automático de funcionamento.

Vale destacar o último botão, o botão de Alteração de Parâmetros. Esse botão permite ao usuário configurar os limites inferiores e superiores de batimentos e rotação. Ele é desabilitado quando o sistema está em modo automático. Pressionado-se esse botão, os botões de mudança manual de marcha se transformam em botões que permitem aumentar ou diminuir o valor desses parâmetros em passos de 5. A cada pressionamento desse botão, um desses limites se torna passível de edição, e após todos terem sido varridos, o próximo pressionamento retorna o sistema ao estado de funcionamento normal (os botões de mudança manual retomam suas funções padrão). Enquanto os valores estão sendo editados, o usuário pode visualizar sua alteração em tempo real pelo visor.

3) Simulador dos elementos de aviso: simula o comportamento dos dispositivos auxiliares de monitoramento, a princípio LEDs. O primeiro, vermelho, informa ao usuário que uma mudança de marcha está sendo efetuada, e enquanto estiver aceso recomenda-se a suspensão

das pedaladas para que o sistema efetue a mudança sem complicações.

Os dois outros LEDs, azuis, informam ao usuário, quando em modo Automático, que o sistema detectou uma extrapolação dos limites permitidos. O primeiro corresponde ao controle de rotação e/ou batimento e o segundo ao controle ligado à cadência (intenção).

4) Simulador dos Sensores: simula o comportamento dos dispositivos de detecção (sensores). Permite a variação dos parâmetros rotação e batimentos, variáveis de controle do sistema. O valor desses dois parâmetros é constantemente avaliado pelo sistema e sua comparação com limites geram as ações de controle. Existem controles de aumento e diminuição de passo 1 e 5 de cada um dos sensores. Vale destacar que enquanto a rotação é uma entrada voluntária do usuário, os batimentos é uma resposta de seu organismo às condições externas e constitui uma variável de estado sob a qual o operador não possui controle direto, ou seja, é uma entrada involuntária.

5) Gráfico de Estado 1 - Rotação: forma visual de se acompanhar a evolução da rotação dos pedais. Plota o gráfico correspondente às últimas 16 leituras do sensor (16 segundos). Contém duas linhas horizontais que correspondem aos limites inferior e superior de rotação. Esses limites podem ser fixos, no caso do controle por rotação (podendo ser alterados pelo botão Alteração de Parâmetros) ou variáveis, no caso do controle por cadência. Nesse caso, esses limites correspondem a uma estreita faixa calculada a partir de uma média estatística das últimas 16 medições. Pode-se visualizar a constante alteração dessa faixa ao longo do tempo, pois ela procura seguir o comportamento da própria rotação.

6) Gráfico de Estado 2 - Batimentos: forma visual de se acompanhar a evolução dos batimentos ao longo do tempo. Também possui duas faixas correspondentes ao limite inferior e superior de batimentos, valores os quais o sistema procura manter os batimentos do atleta, efetuando para isso as mudanças de marcha que considera que surtirão o efeito desejado.

O Dispositivo de Realização do controle foi desenvolvido em Visual Basic, que permite uma programação paralela e assíncrona direcionada a eventos, características essenciais de um Controlador Programável real.

Implementação do sistema de controle

O passo seguinte para o desenvolvimento do sistema é a substituição progressiva dos Dispositivos simulados pelo software simulador por dispositivos reais. Primeiramente, deve-se desenvolver uma forma de se ligar sensores reais aos programa, desenvolvendo drivers que permitam que suas saídas sejam recebidas pelo computador e se tornem entradas passíveis de serem lidas pelo programa. Isso permitiria a realização dos testes necessários para o desenvolvimento de uma lógica de controle mais precisa, refinada e eficiente.

A leitura de sensores reais permitiria o início de uma fase de estudos minuciosos do comportamento do sistema homem-bicicleta. Para isso, seria necessário o levantamento de variadas curvas que co-relacionassem rotação, batimentos, velocidade, solicitação e marchas. Um estudo matemático dessas curvas permitiria a elaboração de regras gerais que embasassem o desenvolvimento de um controle otimizado da administração de marchas. Essas regras gerais, pelo caráter pessoal de seu comportamento, devem ser particularizáveis o suficiente para que o sistema possa ser utilizado por qualquer pessoa, de maneira ajustada a esta pessoa, e não segundo uma média das pessoas, o que pode tornar o sistema inadequado no tocante à otimização.

Quando a lógica de controle estiver satisfatoriamente desenvolvida, pode-se passar para a implementação efetiva de um sistema de controle embarcado. Para isso, os dispositivos devem ser ligados a algum tipo de Controlador Programável, que possa efetuar operações semelhantes àquelas efetuadas pelo software simulador, interligado a dispositivos reais de entrada e saída (visor, LEDs, sensores e atuadores). Para isso ser factível, é necessário o desenvolvimento de um atuador que possibilite uma mudança de marchas a partir de pulsos elétricos, gerados pelo Controlador. Esse atuador é tema do próximo capítulo.

O Mecanismo Atuador

Introdução

Visto até aqui como a “caixa-preta” capaz de trocar as marchas da bicicleta sem a intervenção direta do ciclista, o mecanismo atuador, que compõe, em parceria com um dado processador de sinais e com os sensores outrora descritos, a chamada parte de **hardware** do projeto, tem papel fundamental no conjunto funcional como um todo, mas já traz consigo, e apenas consigo, um alto valor, tanto no caráter inventivo como no utilitário.

Propriedades

Discutamos então algumas características esperadas deste integrante e a maneira como encará-las.:

Conforto, agilidade e segurança:

Com o advento da possibilidade de se trocar a relação de transmissão de força durante a atividade ciclística, surge então a problemática de como fazê-lo de maneira mais rápida e precisa – em outras palavras, mais ágil - e, porque não, mais confortável.

São algumas as preocupações inerentes a essa problemática acerca da forma como são executadas essas trocas de marcha. Se pensarmos em termos competitivos, basta então se frisar que uma marcha mal trocada durante uma prova pode significar ao atleta a perda do chamado pelotão, ou bloco de bicicletas - que lhe provém abrigo do arrasto aerodinâmico (o chamado “vácuo”), além de ditar o ritmo de esforço a se manter – ou ainda o desacoplamento da corrente, que pode vir a causar atrasos e até uma queda.

No caso do usuário de bicicleta sem pretensões de alta performance – e mesmo daqueles que assim desejarem – fica latejante a questão do conforto. É comum se tirar o corpo duma dada postura para que se alcance o comando das marchas ou então que se tenha que despender uma atenção especial à chave de troca para que a quantidade de cabo liberada ou recolhida seja correta e a marcha desejada seja de fato a acoplada. Dessa questão tratante da atenção que é dedicada ao mecanismo em detrimento daquela dada à pilotagem e ao esforço atlético, pode-se ainda destacar periculosidade e a inconveniência da maneira convencional de se operar o câmbio de bicicleta.

A interface elétrica :

Uma maneira conveniente de se ter conforto na ativação do mecanismo seria um botão digital onde, com um simples toque, o ciclista mudasse a marcha utilizada. Surge então aqui a necessidade de se ter um mecanismo atuador capaz de responder a impulsos elétricos. Quando se pensa ainda na automação deste processo de troca tal qual veio sendo desenvolvida até aqui, baseada num sistema processador digital, é reforçada a necessidade supra-citada.

Leveza, robustez e tamanho:

Essas três características se mesclam numa relação de compromisso complicadora, para a qual se deve encontrar um meio termo. Isso porque de um mecanismo que se embarque numa bicicleta – competitiva ou não – deve-se esperar que sua presença seja de menor notoriedade possível, não incomodando por suas dimensões e tampouco por seu peso. Normalmente, ao se diminuir o tamanho do aparato, causa-se também uma diminuição de sua massa.

No entanto, tendo em vista as condições severas de uso (tensões de cabos, impactos frequentes e exposição a intempéries), o aparato deve possuir certa robustez, conseguida em geral por meio da adição de material em forma de peças de reforço e proteção, o que contribui no aumento da massa do sistema.

É no tocante a esses aspectos que foi feita, logo de partida, uma concessão de aspecto mais que facilitador, na verdade uma reformulação de cunho possibilitador: qualquer que seja a solução encontrada, seu peso e dimensão seriam aqueles que se apresentassem ao decorrer do projeto, que se basearia na confecção de um bólido resistente e robusto, capaz de vencer suas próprias forças internas de atrito - ao ponto das mesmas poderem ser desconsideradas – e para ser utilizado em condições ambientais normais, o que significa, a grosso modo, sem chuva e num piso livre de grandes irregularidades.

Autonomia:

Quando se fala em um passeio de bicicleta, há de se considerar o uso da mesma por cerca de pelo menos meia hora. Em se tratando de um treino sério, esse mínimo vai para algo na casa dos noventa minutos, podendo atingir seis, sete, oito horas ou mais. Assim, para que se tenha um mecanismo atuante durante todo o período de utilização, deve-se ter uma máquina de baixo consumo ou de auto-suficiência em termos energéticos.

Delineando a solução

Uma vez apresentados os requisitos principais de projeto, é possível a opção dentre pelo menos duas grandes vertentes de projeto:

Um caminho seria reinventar a maneira convencional de se transmitir a força à roda por meio da corrente, ou então, o modo como é feito o deslocamento dessa corrente entre as diferentes rodas dentadas do pinhão. Neste caso poderia se contrariar o tratamento discreto dado até aqui aos estados de operação da bicicleta (marchas 1, 2, 3,...), no caso de se ter uma variação contínua de torque. No entanto, o principal empecilho é a dificuldade de se fazer tal inovação já tentada há tanto tempo – e, por isso, aparentemente complexa – dentro de um trabalho do porte do presente.

Além disso, ao se utilizar o movimentador da corrente convencional, abre-se a opção de se adaptar qualquer câmbio a essa nova realidade, tornando o projeto menos custoso e mais atraente nos aspectos de utilidade e de possível comercialização.

Portanto, parece mais interessante que o outro caminho seja seguido, onde se procure arquitetar um aparato que se utilize do câmbio de bicicleta no seu estado da arte atual, transformando sua operação numa orquestra onde a robustez do mecanismo já consagrado se afine com a precisão, agilidade, segurança e conforto trazidos pela inserção de uma novidade funcional.

Desse modo, o mecanismo perseguido pode ser entendido como um administrador do cabo de aço que opera o câmbio propriamente dito, fazendo as vezes da chave-alavanca – também conhecida por chave “gonzo” e similares mecanismos usualmente utilizados (Figura 17).

Obviamente, não se faz necessário num primeiro momento o projeto desse aparato para ambos os câmbios – dianteiro e traseiro – da bicicleta, fazendo-nos optar pelo traseiro, onde as forças envolvidas e as amplitudes dos movimentos de cabo são menores. Além disso, ao posterior estudo do controlador do sistema homem-bicicleta muito melhor serviria a intervenção neste câmbio, que possui sete opções de rodas dentadas, contra as duas do câmbio dianteiro.



Fig.16 - A consagrada chave “gonzo” de operação do câmbio

A concepção

Com a tarefa de se desenvolver esse aparato segundo os requisitos impostos, logo se colocaram as idéias, procurando-se não descartar sem motivos lógicos nenhuma delas. No entanto, a questão da autonomia pareceu clamar por atenção especial logo no início dos *brainstorming's*. Isso porque a forma sob a qual a energia seria armazenada e/ou gerada para que o mecanismo a utilizasse seria de total influência no tipo de atuador a ser escolhido.

Utilizar a eletricidade de maneira direta para tracionar o cabo de aço implicaria num consumo exacerbado – um solenóide ou um motor - suportado apenas por uma bateria de grande porte, pesada e inconveniente. Igualmente inadequado seria um dínamo acoplado à roda ou aos pedais, pois além do peso extra dessa pequena usina, se estaria acrescentando uma carga extra às pernas do ciclista, desvirtuando por completo o propósito facilitador do projeto.

Armazenar-se energia sob a forma de pressão - ar comprimido - foi outra proposta, descartada pelo porte do cilindro necessário e pela característica finita do mesmo. Eis que, num átimo inventivo, surgiria então uma solução eletro-mecânica, mescladora de um atuador elétrico de baixa potência (um ou mais solenóides, estes sim, suportáveis por longos períodos por uma pequena bateria) com um armazenador elástico de energia, este recarregável em qualquer instante pelas mãos do ciclista, detentoras de relativa disponibilidade durante a atividade ciclística.

O armazenador elástico poderia ter natureza linear ou torcional, metálica ou elastômera. Por questões de força e durabilidade optou-se pelos aços-mola, deixando-nos como opções as molas helicoidais, espirais (“de relógio”) e torcionais simples (“de ratoeira”). Dentre as mesmas, a que maior banda de trabalho combinada a facilidade de recarga apresentou foi a espiral, dando o golpe de misericórdia nas demais pela sua natureza compacta, aspecto importante neste projeto, ainda que, por ora, não fundamental.

Mas como utilizar essa força disponível de maneira controlada e precisa? Isso poderia se tornar viável por meio do sistema de acoplamento de pinos esboçado e descrito a seguir, que recolhesse ou liberasse quantidades adequadas de cabo a cada mudança de marcha. Entendamos agora o princípio funcional desse trâmite mecânico:

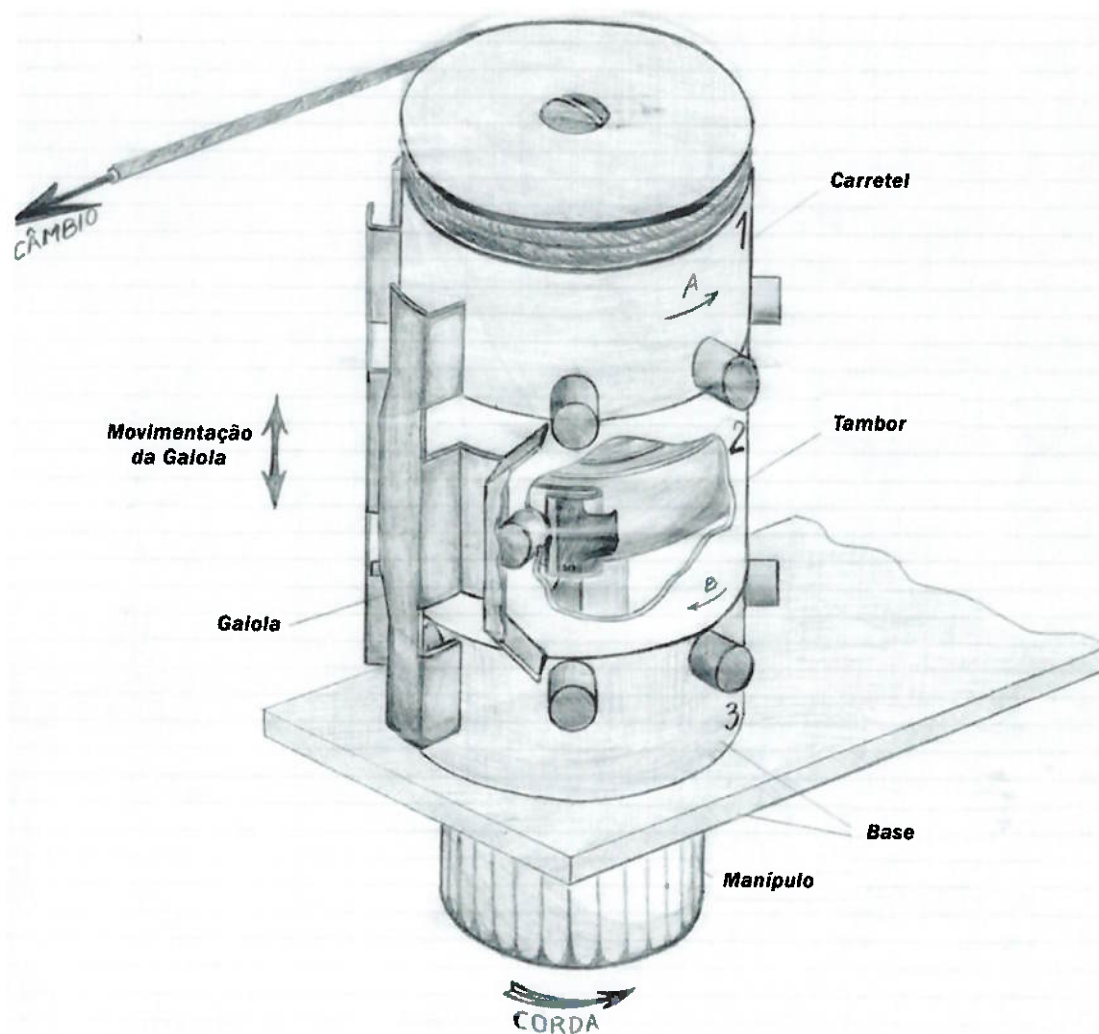
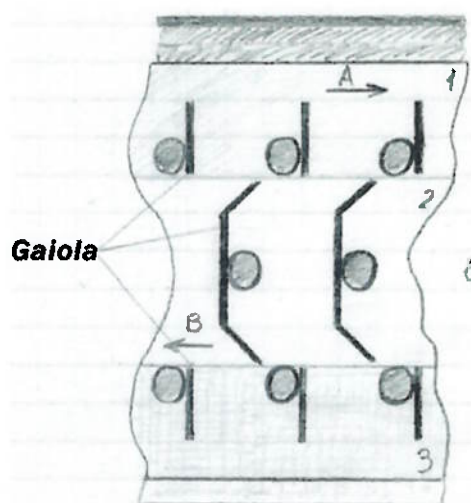


Fig. 17 - Desenho ilustrativo do projeto do mecanismo

Após o giro do **Manípulo** segundo sentido indicado de corda, a **Mola Espiral** tende a girar o **Tambor** (2), que a contém internamente, no sentido de B. ao mesmo tempo, o **Carretel** (1) tende a ser girado no sentido de A, graças à tração imposta ao cabo pela mola interna do câmbio. Vale lembrar que, tanto no esboço artístico como no esquema planificado das peças cilíndricas, a **Base** (3) encontra-se fixa ao corpo da bicicleta.

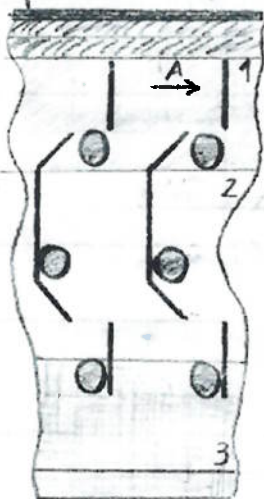
Na situação ao lado, a **Gaiola** impede todo os pinos de se moverem, impedindo conseqüentemente os movimentos nas direções A e B.

É claro que, para que esta estabilidade se instale, é necessário que o momento imposto pela **Mola Espiral** ao conjunto supere aquele causado pela tração do câmbio no cabo quando multiplicada pelo raio (braço) do **Carretel**. Partamos agora para a análise do comportamento do mecanismo quando da movimentação da gaiola:

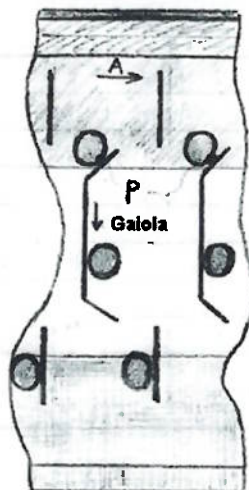


- **Aumento de marcha / Descida da corrente:**

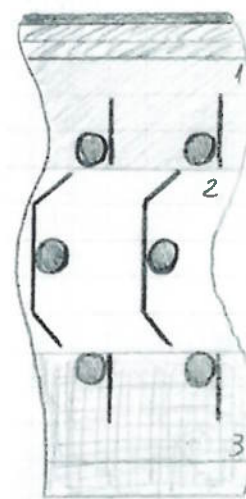
Caso se deseje liberar uma unidade de cabo no sentido de A — basta que se desloque a **Gaiola** uma distância **a** para cima, o que desencadeará o seguinte processo:



O movimento **B** entre 2 e 3 continua impedido, mas o movimento **A**, entre 1 e 2, não;



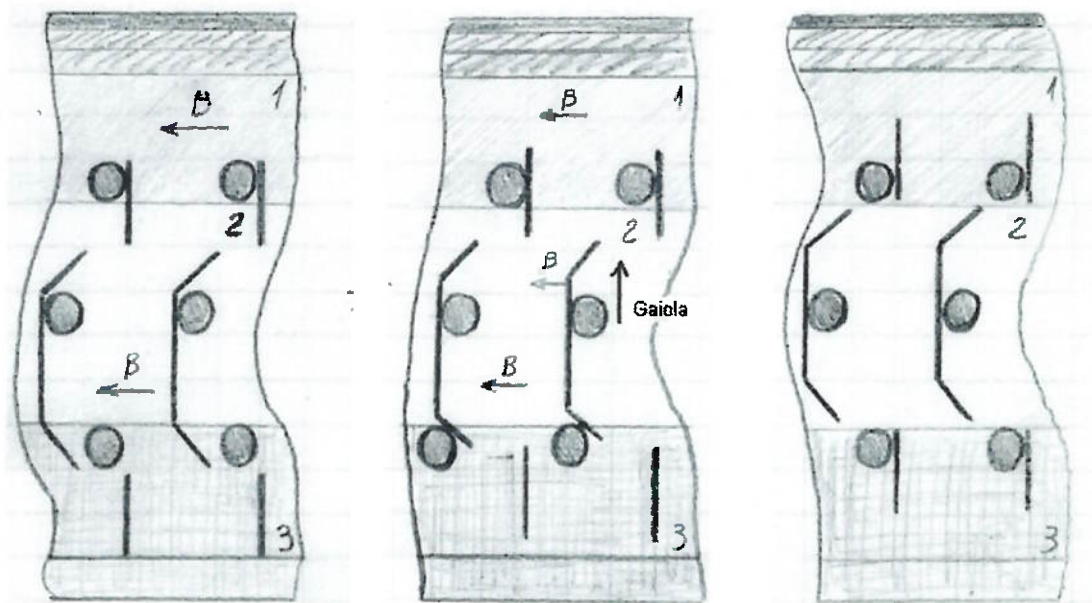
Ao tocar a **Gaiola**, os pinos de 1 tendem a empurrá-la novamente para baixo, através do contato nos pontos **P**'s²;



Ao fim do ciclo, a **Gaiola** voltou à sua posição central, e 1 deslocou-se uma distância **a** em relação a 2 que, por sua vez, ficou parado em relação a 3;

- **Diminuição da marcha / Subida da corrente:**

Se o desejado for o contrário, e o que se busca é o recolhimento de uma unidade de cabo, a **Gaiola** deverá ser deslocada uma distância **a** para baixo, possibilitando os eventos a seguir:



Note que agora a **Gaiola** – ainda solidária a 2 – não mais impede que 2, juntamente com 1, se movimente no sentido de **B**;

Analogamente ao caso anterior, o movimento tende a realocar a **Gaiola** na posição central 2;

Ao fim deste ciclo, a **Gaiola** também volta a repousar na posição intermediária, e o cabo foi recolhido em uma unidade;

A evolução para um mecanismo que já possuísse uma configuração realista, onde as partes estivessem bem definidas em suas funções e o formato básico dos componentes já se aproximasse do definitivo reluziu num segundo esboço, de feições um pouco mais técnicas, embora ainda ilustrativo (Figura 19).

Embora não se faça evidente, uma segunda análise desses sistemas ressalta uma diferença funcional importantíssima entre os dois: o fato de que o segundo modelo pode ser recarregado durante a sua operação, pois o acoplamento do botão à mola espiral é feito pelo eixo, agora móvel, enquanto no primeiro a mola era torcida pela sua extremidade externa, travando sua ação durante o momento de recarga.

Para tal, foi necessária a inserção de uma segunda mola, esta na região interna da base, constituindo-se então uma catraca. Isso porque o chamado tambor - responsável pelo acoplamento entre a mola e a gaiola - fôra descartado. Agora, o elemento elástico se acoplava diretamente à gaiola, e uma utilização pouco usual dessa mola espiral seria experimentada. A espiral sofreria, além da usual torção, um deslocamento de seu centro no sentido perpendicular a seu plano de enrolamento (Figura 19). No entanto, a reduzida amplitude dessa movimentação - principalmente quando comparada a seu diâmetro - permitiria essa operação alternativa².

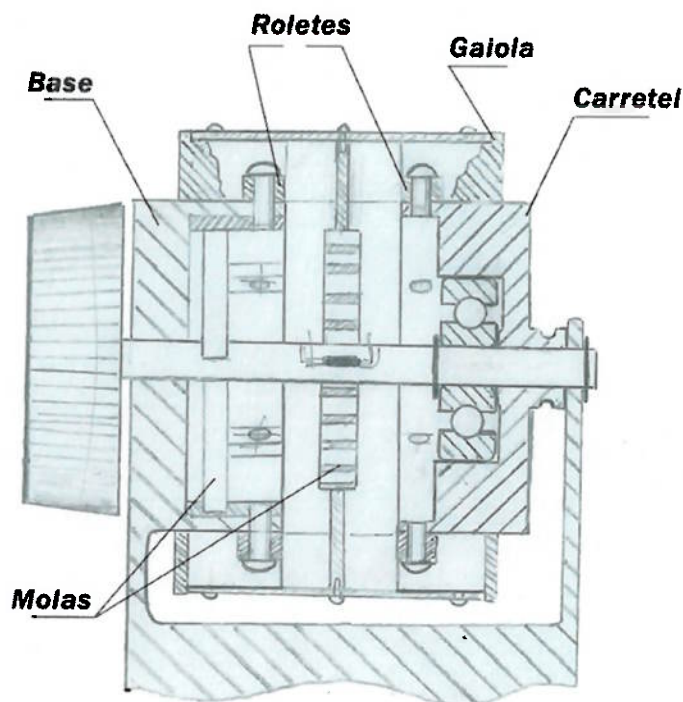


Fig. 18- Esboço da concepção já avançada do mecanismo



Fig. 19 - Deformação exacerbada ilustrativa da operação alternativa da mola espiral

2. A configuração em ângulo das guias da gaiola, bem como a perturbação causada no elemento elástico, geram forças, por assim dizer, restauradoras da gaiola à sua posição original. Essas características construtiva são eficazes eliminadoras da inconveniente mola de retorno normalmente necessária nos solenóides, que aumenta sua carga de trabalho. Dá-se portanto, com essas peculiaridades do mecanismo, importante passo a caminho da redução do consumo elétrico e, conseqüentemente, do aumento de sua autonomia em termos energéticos;

Do mais, desta concepção à definitiva, as mudanças foram guiadas por considerações sobre a fabricação, a montagem e sobre os esforços a serem suportados sem, no entanto, modificar de maneira profunda a configuração até aqui apresentada.

Pode-se ressaltar como o ápice de transformação deste período a oposição da extremidade do eixo pela qual se acoplaria o manipulador de corda, manobra feita com o propósito de deixar o lado da base completamente livre para a inserção futura dos solenóides.

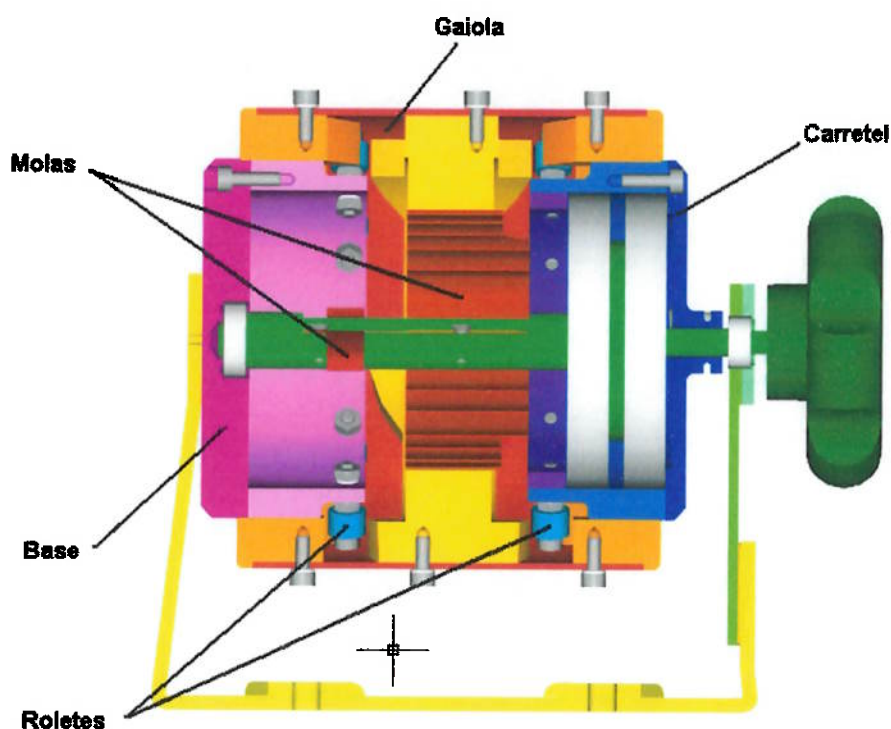


Fig.20 - Vista em corte da concepção final do mecanismo

Torna-se pertinente ressaltar, atingido este ponto, que a pretensão deste projeto mecânico é a obtenção do mecanismo sem a sua parte elétrica, deixando o acoplamento dos solenóides como escopo de uma futura continuação do mesmo. O que se pretende ao fim dessa empresa é a constatação do sucesso ou do infortúnio da funcionalidade puramente mecânica desta faceta do hardware, dando assim o aval ao projeto do atuador elétrico que, aí sim, terá seus requisitos de força e consumo determinados.

A bicicleta-protótipo e suas características

A bicicleta escolhida para a montagem e experimentação do protótipo foi uma Bottechia de competição, especialmente reformada para esse honroso propósito. Esta ferramenta da velocidade, que possuía originalmente duas marchas no conjunto dianteiro a sete no traseiro, teve seu câmbio anterior removido – ficando a corrente estanque numa das coroas – por motivos de



Fig. 21 - A bicicleta protótipo sobre o suporte



Fig. 22 - Detalhe do suporte

simplificação. Ainda por esse motivo, houve a remoção dos freios, já que numa primeira fase, a bicicleta seria testada sobre o chamado rolo de treino (Figuras 21 e 22), um suporte que possibilita a operação da mesma numa situação estática, com a capacidade de inserção de uma carga variável de esforço (sistema magnético), muito usado por ciclistas quando da impossibilidade de efetuarem um treino em campo.

A remoção do freio traseiro também foi providencial à preparação da bicicleta para a chegada do invento, pois a furação no quadro utilizada para sua fixação serviria agora à colocação do suporte.

A posição de saída do cabo de aço também foi reformulada, de modo a se encurtar o caminho até o mecanismo atuador, transformando-o numa reta, onde o atrito fosse minimizado (Figura 23).

Ainda nessa empreitada em busca da minimização do esforço a ser exigido do mecanismo, especulou-se a troca da mola interna do câmbio Shimano de sete velocidades utilizado.



Fig. 23 - O câmbio e a fixação da saída do cabo

Molas de constantes elásticas inferiores à da original foram testadas (Figura 24), tendo sido avaliadas as suas performances através da facilidade com que as mesmas atuavam. Foi constatado que a tensão imposta pelas molas testadas na situação em que estas precisavam atuar, ou seja, quando a corrente devia passar de uma roda dentada maior a uma menor, era reduzida demais para que a troca da marcha e a movimentação do mecanismo atuador se fizessem de maneira rápida e confiável. Logo, a mola original foi mantida e, com a posição do cabo e a mola interna definidas, poder-se-iam ser mapeadas as trações necessárias no cabo para cada troca, ou seja, com que tensão no cabo cada movimentação da corrente – tanto de aumento quanto de redução de marcha – ocorria. Esses dados puderam ser colhidos num ensaio simples, dando origem à tabela 2.



Fig. 24- O câmbio e as molas alternativas

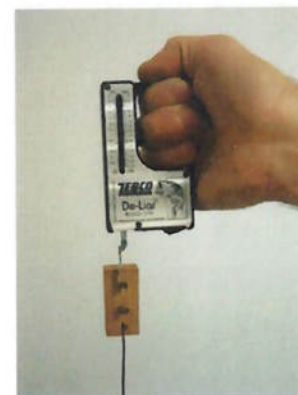


Fig. 25- O dinamômetro utilizado no ensaio de tração

Com o uso de um dinamômetro (Figuras 25 e 26) , previamente aferido com pesos confiáveis (volumes definidos d'água), foram sendo registradas as trações exercidas pelo cabo no momento de cada troca de marcha.

Transição das rodas dentadas	Tração no Cabo (kgf) Erro: 0,25 kgf	
	Aumento da marcha	Diminuição da marcha
1-2	1,50	5,00
2-3	1,50	4,75
3-4	1,50	4,75
4-5	1,50	4,50
5-6	1,25	4,25
6-7	1,00	3,50

Tabela 2 - Dados do ensaio de tração



Fig. 26 - O aparato de ensaio para a obtenção da tração T

Nesta montagem, o dado buscado com maior interesse foi a força máxima T (destacado em vermelho na tabela 2), que nos viria dar uma noção importantíssima da grandeza da tensão com a qual nosso mecanismo teria que lidar, sendo guia fundamental da próxima etapa do projeto: a escolha da mola espiral.



Fig. 27 - A marcação do ΔL no cabo

Concomitantemente a esse ensaio, e por meio de um marcador no cabo (Figura 27), mediram-se outros parâmetros de importância futura: o curso total ΔL necessário para que as sete posições do câmbio fossem varridas; e as posições intermediárias do mesmo, que se apresentaram uniformemente distribuídas neste intervalo.

Escolha da Mola

Pode-se dizer que um dos elementos fundamentais, nesse mecanismo facilitador é o acumulador de energia mecânica que, de fato, disponibiliza o trabalho necessário à troca das marchas para ser utilizado quando se queira. Esse componente - a mola espiral - tem portanto importância primária e influência direta no projeto e dimensionamento dos demais elementos do mecanismo.

A tomada de dados descrita anteriormente definira a tração máxima T no cabo, que é aquela necessária para que a troca de marcha acontecesse na pior das situações, e que foi a escolhida como mínima aceitável no mecanismo. Essa robustez foi garantida no dimensionamento da mola por um coeficiente de funcionamento f , e com base nesse valor $T \cdot f$ corrigido em segurança, puderam ser esboçadas as possíveis ou aceitáveis características para a mola.

Esse elemento elástico foi modelado como linear, possuindo assim uma constante elástica k (kgf.m/rad). Considerando-se que m trocas de marcha seriam armazenadas e que o momento final para tal fosse $n\%$ maior que o mínimo de funcionamento M_o , foram calculados os valores teóricos de diversos $k_{m-n\%}$. Note-se ainda que foram varridas as várias possibilidades

para o número p de pinos do mecanismo, o que definiria outros parâmetros do projeto, tais como o raio R do carretel, a unidade angular de troca de uma marcha $\Delta\theta$ - e por consequência, o curso total angular do carretel $\Delta\Theta$ para varredura de todas as posições do cabo- e o próprio M_0 .

Ao se observar a planilha de Análise dos Parâmetros (Apêndice T), torna-se notório que o ideal seria a obtenção duma mola de k mínimo, que armazenasse infinitas trocas de marcha com uma mínima variação do momento oferecido, ou seja, algo na região esquerda superior da mesma. Durante essa análise, foi possível uma melhor visualização do comportamento esperado da mola através da plotagem dos gráficos de Análise dos Parâmetros I, II e III (Apêndice II).

No entanto, por questões de custo e dificuldade de projeto por parte dos fabricantes de molas espirais, o caminho inverso teve que ser tomado, sendo obtida uma mola protótipo, inicialmente escolhida segundo seus aspectos de robustez, tais como largura e espessura da fita metálica, bem como de capacidade de armazenamento e linearidade, traduzidos por um número aceitável de espiras. Com essa candidata em mãos, iniciaram-se exaustivos ensaios, que geraram, ao fim de uma epopéia experimental, um mapeamento da características desse elemento. Agrupados na planilha de Estudo da Mola Protótipo, os dados coletados sofreram então uma análise para a definição de parâmetros importantes, como o supra-citado número de pinos p , assunto da próxima discussão.

Definição do número de pinos p

O número de pinos existentes em torno do carretel e da base, aos quais se acopla a gaiola, define o raio do carretel, por definir o espaço angular varrido pelo mecanismo a cada troca de marcha. $\Delta\theta$.

Como o raio R do carretel possui um mínimo aceitável – por razões de flexão do cabo- e como $\Delta\theta$ tem um limite mínimo - por questões de espaço para fabricação e montagem – logo foi definido que p estaria entre 8 e 12.

Teria então início o ensaio gerador dos dados constantes na planilha de Estudo da Mola Protótipo (Apêndice II), com um passo primordial: a marcação da torção inicial a partir da qual já se obtinha um momento superior àquele tão almejado M_0 , sendo o ângulo α contado a partir de tal referência com o uso do clássico transferidor dos tempos do colégio (Figura 28).

O mesmo dinamômetro outrora usado na medição das tensões no cabo foi agora o delator da força no cordão enrolado do aparato experimental (Figuras 29 e 30), que

multiplicada pelo R_{nominal} conhecido do eixo de madeira utilizado, resultaria no **Momento** oferecido pela mola. Pôde-se plotar então o

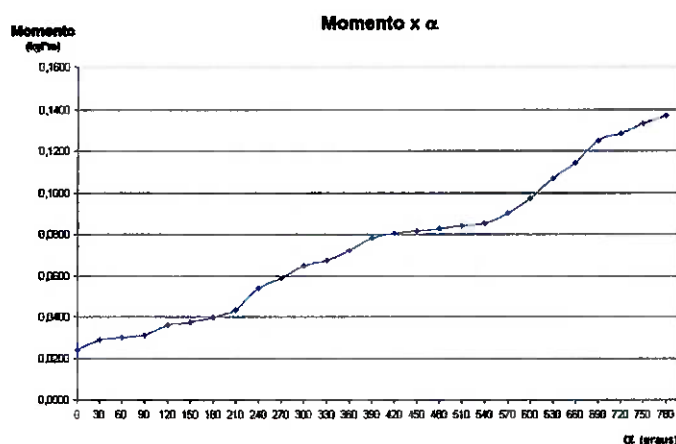


Gráfico 1 - Gráfico de Estudo da Mola Protótipo

gráfico de Estudo da Mola Protótipo (Apêndice II).

Como parâmetro auxiliar de análise, ainda o diâmetro da mola para cada situação foi registrado (Figura 31), à luz do fato de que se tratava da mola livre, podendo compactar-se quando abraçada por alguma peça de natureza anular.

A esse ponto, nova observação - agora dessa mola em particular - do número de marchas armazenadas confrontado com a sobrecarga do sistema foi feita. Da análise fria e científica dessa última, constatou-se que um p igual a 10 ou 11 seria igualmente ótimo, pois assim se obteria uma melhor relação entre m e % de M_o (Note-se a região de maior horizontalidade do gráfico, onde o valor de k se torna mínimo).

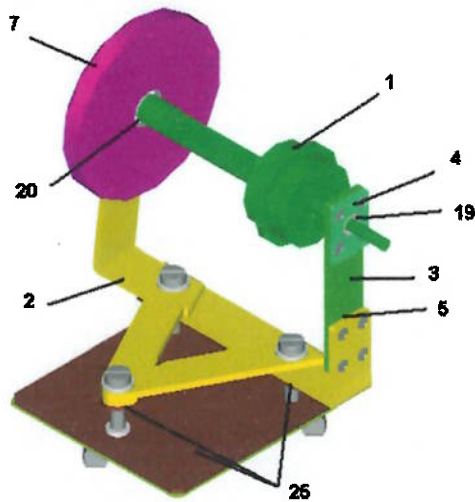
Mas foi o número par **10**, que na fabricação, montagem e funcionamento ofereceria simetria e maior espaço de trabalho, o grande eleito.



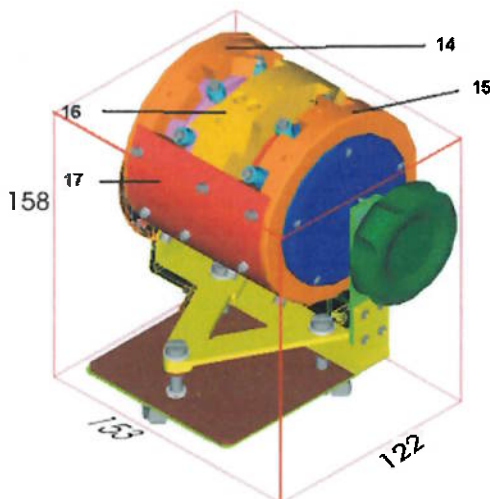
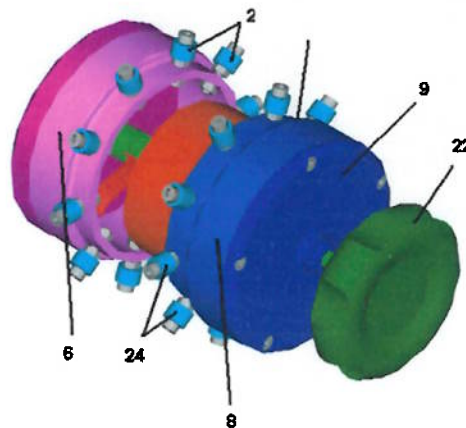
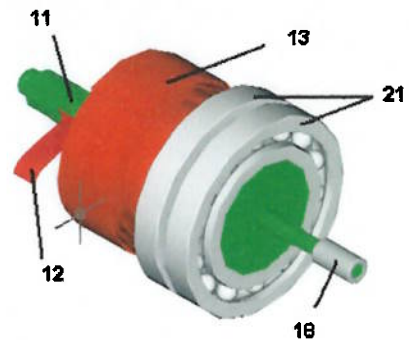
Figs. 28, 29, 30 e 31 (de cima para baixo) - Fotos do ensaio da mola protótipo

A Solução Final

Atingimos aqui o momento oportuno de apresentação da solução tal qual se foi moldada, guiada pelos requisitos e parâmetros discutidos até o momento. Voltemos o foco aos componentes da configuração mais avançada – e final - do nosso bólido, seguindo com sua apresentação física e justificativas de projeto:



1. Eixo;
2. Corpo do Suporte;
3. Extensão do Suporte;
4. Contra-chapa;
5. Espaçador;
6. Panela da Base;
7. Tampa da Base;
8. Panela do Carretel;
9. Tampa do Carretel;
10. Anel do Carretel;
11. Chaveta;
12. Mola da Catraca;
13. Mola Espiral;
14. Gaiola da Base;
15. Gaiola do Carretel;
16. Gaiola Central;



17. Cascas da Gaiola;
18. Bucha Metálica;
19. Rolamento Radial de Esferas 685 Z;
20. Rolamento Radial de Esferas 688 AZ;
21. Rolamentos Radiais de Esferas 16007;
22. Manípulo;
23. Roletes da Base;
24. Roletes do Carretel;
25. Borrachas do Suporte;

Escolha de materiais e peças prontas

As considerações outrora feitas sobre a relação entre peso, resistência e tamanho finais do aparato levaram as decisões acerca dos materiais a serem utilizados no projeto a certas simplificações de ordem prática, gerando a seguinte configuração:

- **Gaiolas da Base, do Carretel e da Mola:** usinados em *Nylon*, promovendo a redução do atrito³ contra as partes metálicas e roletes, além de aceitarem melhor possíveis deformações exigidas dessas peças. Ainda, a geometria complexa e o nível de detalhes construtivos dessas partes, requisitantes de processamentos manuais de fabricação e acabamento tais com limadura, corte e lixação, poderiam ser mais facilmente atingidos quando da utilização de uma matéria-prima mais mole;
- **Cascas da Gaiola:** em duralumínio, material de resistência química excelente - ótimo para colocação periférica - e de bom comportamento frente à calandragem pela qual deveria passar. Nesse caso, a geometria côncava das peças veio a aumentar sobremaneira a rigidez da chapa de 1,5 mm utilizada;
- **Roletes da Base e do Carretel:** fabricados a partir do torneamento de um bastão de *Delrin*, polímero de grande dureza, ideal para o caso de uma peça atritante contra a superfície irregular de um parafuso. Essa escolha veio a possibilitar o uso academicamente recriminado desse elemento roscado de fixação sob a forma de eixo;
- **Panela e Tampa da Base, Panela e Tampa do Carretel, Corpo do Suporte, Chapa do Suporte, Extensão do Suporte, Contra-chapa, Espaçador, Eixo, Chaveta e Bucha Metálica:** obtidos a partir de peças brutas de Aço 1020, por sua boa ponderação entre resistência e facilidade de processamento e custo;
- **Mola da Catraca:** obtida a partir de uma fita de aço mola temperado;
- **Borrachas do Suporte:** material flexível, capaz de conformar-se entre as partes do Suporte e o corpo da bicicleta, unindo-os de maneira mais suave e completa;

3. A lubrificação com óleo especial de corte para polímeros é também tentada, figurando como elemento co-adjuvante na redução das forças atritantes indesejadas sem, no entanto, agredir quimicamente os polímeros envolvidos;

O conjunto das partes a serem obtidas já fabricadas, composto por diversos **parafusos, porcas e arruelas da série métrica (M3, M5 e M6), Rolamentos radiais de esferas 685 Z (HCH), 688 AZ (NSK) e 16007 (RCM), Mola Espiral e Manípulo**, requeriu apenas algum processamento simples, como a adequação do comprimento de alguns dos elementos roscados e a diminuição da largura da mola em sua região periférica, sempre para fins de adequação das medidas aos espaços disponíveis.

A escolha dos rolamentos foi feita à luz do bom senso, atentando-se ao fato de que a utilização dos mesmos seria encarada como quase estática, ou seja, os desgastes com rotação contínua poderiam se desconsiderados.

Com essa questão da fadiga por ciclos posta de lado, levando-se em conta que a ordem de grandeza das forças envolvidas estava muito aquém daquela tida como limite para esse grupo dimensional de mancais de esferas, e ainda que as cargas radiais seriam apenas as impostas pela montagem – pelo menos para os dois rolamentos de suporte do eixo – bastou-se encontrar os equipamentos que melhor atendessem aos requisitos de diâmetro interno – impostos pelo eixo - e largura da pistas.

No caso dos dois rolamentos maiores e idênticos, responsáveis pelo suporte do carretel, seu diâmetro foi definido maior, uma vez que isso facilitaria o trabalho de contenção do binário fletor – em relação à linha do eixo – imposto pelo cabo enrolado não entre os mesmos, mas a uma certa distância, o que gera um “braço de força”.

Formalização, execução e registros

Com as etapas descritas de coleta de dados, esboço geral, determinação de valores cruciais e aquisição de partes prontas já concluídas ou em andamento, tornou-se imediato o início da formalização técnica e posterior fabricação do aparato.

No entanto, por questões de priorização de metas e tendo em vista o caráter moroso da execução dos desenhos e das atividades usinagem, e ainda, sendo o projetista e o executor a mesma personagem – fato facilitador do fluxo e atualização das informações (*feed back* de projeto) - os desenhos técnicos em sua versão completa foram sendo concluídos em concomitância com as partes a que se referiam, de modo a serem oportunamente colocados à ocasião de registro da patente deste bólido.

A fabricação das peças foi executada em tempo quase integral no LMO (Laboratório de Máquinas Operatrizes) do departamento de Engenharia Mecatrônica de nossa Escola, sob autorização dos indivíduos competentes. Lá puderam ser experimentadas as enriquecedoras atividades de fresagem, torneamento, corte, furação, retificação, medição, marcação, solda, calandragem, uso de ferramentas manuais, entre outras.

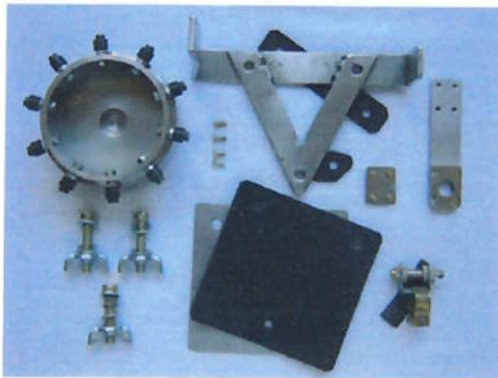
A bicicleta-protótipo pôde ficar também disponível no mesmo prédio – em sala cedida pelo professor orientador do presente trabalho - para eventuais consultas, montagens experimentais e coletas de dados.

Outras atividades complementares foram executadas ainda em oficinas alheias à organização politécnica, complementando a manufatura do aparato em questão.

Montagem e teste:

A fase de junção final das partes do engenho foram precedidas de pequenas *prêmieres* de montagem, onde puderam ser testados os acoplamentos e as coerências dimensionais, especialmente entre as peças componentes de cada micro-sistema:

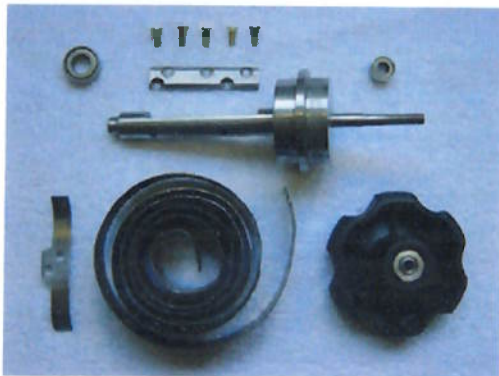
Sistema de Fixação;



Sistema de Enrolamento:



Sistema de Torção;



Sistema de Acoplamento:

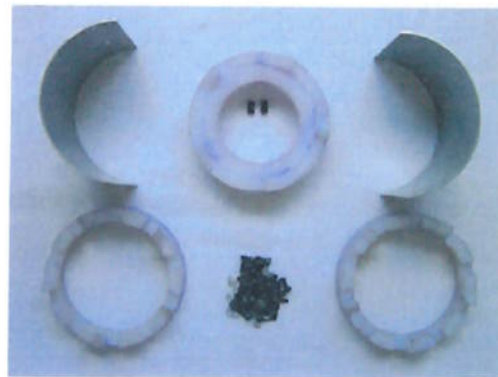


Fig. 32 - Os mais de dois quilogramas de metal e polímeros

Com a fase de fabricação de todos os componentes completamente acabada, um passo importante foi o registro da massa total do conjunto, que veio a somar 2.220g, entre aço, alumínio e polímeros.

Partindo-se para a montagem, uma atenção especial foi requisitada pelo fator ordem de montagem. Isso porque, em alguns pontos, uma otimização desse processo poderia significar uma enorme facilitação – quando não a própria viabilização – do acoplamento total.

Após a fixação do conjunto à bicicleta-protótipo, o mesmo mostrou-se rígido, suportando as elevadas trações sofridas pelo cabo. E foi esse um fator polêmico à ocasião do teste de funcionalidade: as marchas eram trocadas com sucesso no sentido ascendente da corrente, uma vez que isso era executado pela mola, detentora de grande força elástica.

No entanto, a quando uma porção de cabo deveria ser liberada pelo sistema, as forças de atrito remanescentes na via compreendida entre o mecanismo e o câmbio ainda dificultavam o evento. Assim, tendo ciência de que a mola poderia ser ainda mais deformada e, portanto, exigida, foi feito um melhoramento em prol da robustez e agilidade do mecanismo: a troca da mola interna do câmbio por uma outra de constante elástica mais elevada;

De fato, essa manobra conferiu ao conjunto melhores características funcionais, principalmente confiabilidade. Do mais, alguma regulação do comprimento do cabo foi feita e uma lubrificação preventiva - com óleo de corte para polímeros, conforme prevista – realizada.



Fig. 33 - O mecanismo instalado na bicicleta protótipo



Melhorias e Próximos passos

Basicamente, ficam gritantes alguns aspectos característicos deste invento. Sua dimensão e massa devem ser reduzidas drasticamente, provavelmente por uma reformulação do projeto que seja capaz de reduzir a quantidade de peças independentes e eliminar – por meio de um método de elementos finitos, por exemplo – os excessos de material em inúmeros pontos.

Porém, talvez seja mais oportuna, até mesmo antes de uma nova jornada mecânica, a idealização e a fabricação do conjunto de solenóides responsáveis pela configuração final da personalidade mecatrônica deste rebento tecnológico.

Conclusão

Do estudo apresentado, conclui-se que a implementação prática de um sistema de controle para bicicletas convencionais baseado na monitoração do estado do sistema bicicleta-ciclista é factível. Quanto ao desenvolvimento de um dispositivo atuador eletro-mecânico que efetue mudanças de marcha a partir de sinais enviados pelo sistema de controle, pode-se dizer que o trabalho nos colocou numa posição de grande avanço, uma vez que o objetivo por ora almejado foi atingido. Para a implementação de fato desse sistema, além do atuador eletro-mecânico, seria necessário o desenvolvimento da interligação de sensores e botões e do “atuador do atuador” (solenóide) ao controlador programável (CP), através de drivers específicos. Além disso, é necessário um estudo para a escolha do tipo de CP mais indicado para efetuar esse controle.

Listados os tópicos necessários para a implementação física do sistema, discutir-se-á o quão interessante seria um aparato desse tipo. Um administrador eletrônico de marchas é útil e desejável. Primeiramente, o processo de controle se propôs a ser o mais abrangente possível, englobando todas as situações nas quais uma otimização da atividade é possível.

Um bom projeto do sistema de controle pode permitir a ciclistas menos experientes um treinamento comparável aos realizados por ciclistas mais experientes. Essa configuração perfeita de parâmetros é um desafio ao desenvolvimento futuro do sistema, pois esses parâmetros podem variar de pessoa para pessoa e para a mesma pessoa em momentos diferentes. Provavelmente o desenvolvimento dessas características deverá seguir uma implementação via inteligência artificial.

Uma continuidade natural e utilíssima dessa obra deverá ter sequência sob a forma de Mestrado, segundo sugerido por nosso Professor Orientador.

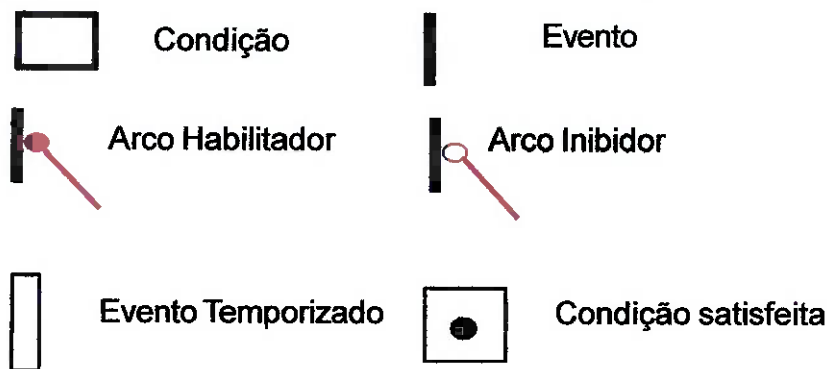
Bibliografia

- [1] ARMELLINI, F., ALVES, G. e COSTA, J., “Desenvolvimento de Plataforma de Controle Baseada em redes Mark Flow Graph”
- [2] BURKE, Edmund R., “Precision Heart Rate Training”
- [3] CORBIN, C. e LINDSAY, R., “Concepts of Physical Fitness with Laboratories”
- [4] FULLER, Dudley, “Theory and Practice of Lubrification for Engineers”
- [4] HANCOCK, Les, KRIEGER, Morris, ZAMIR, Saba, “The C Primer”
- [5] HOLZNER, S., Programando em C++ - “Um Guia Prático para a Programação Profissional”
- [6] KIDWare, “Learn Visual Basic 6.0”
- [7] MATLEV, Lev Pavilovch, “Preparação Desportiva”
- [8] MIYAGI, Paulo Eigi, “Controle Programável - Fundamentos do Controle a Eventos Discretos”
- [9] Shell. “Curso de Lubrificação Industrial - Vol.2”
- [10] SHIGLEY, J.E. e MISCHKE C.R., “Mechanical Engineering Design”

Apêndice I

Estrutura de um MFG

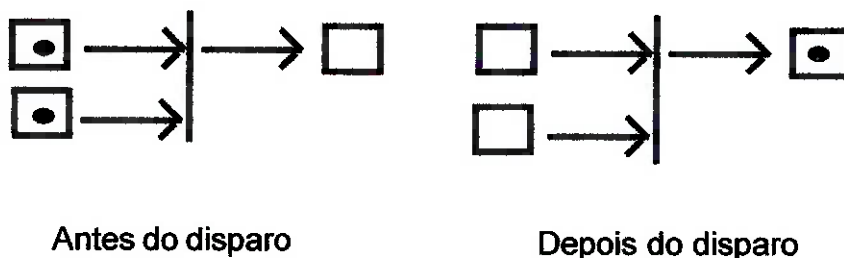
O MFG é uma rede de Petri na qual a comunicação entre o sistema, inputs e outputs é colocada de uma maneira que facilita sua implementação prática. Um MFG é constituído por uma rede de eventos e transições. As condições são representados por quadrados e os eventos por linhas unidimensionais. Existem ainda arcos inibidores e habilitadores e sinais de saída e entrada. Representa-se esses elementos conforme o esquema abaixo. Condições

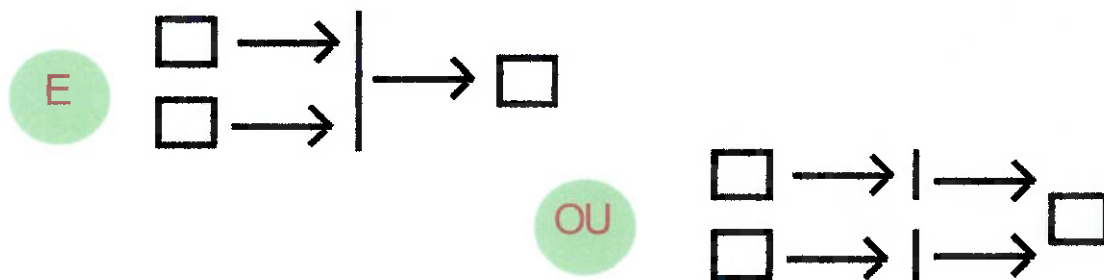
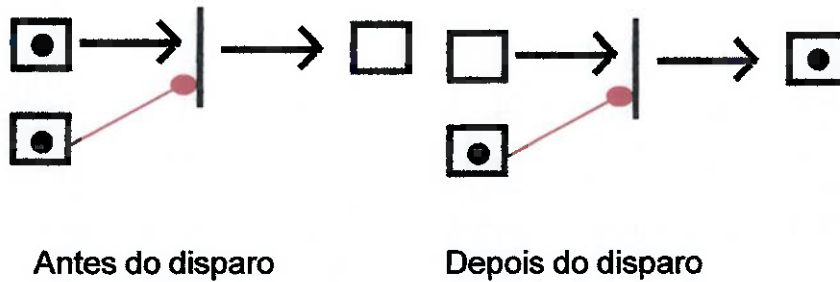


satisfeitas possuem círculos em seu interior.

Um MFG possui um conjunto de regras que define seu sequenciamento. Embora elas sejam inúmeras, e seu detalhamento foge do escopo do trabalho, são as regras básicas:

1) Um evento é disparado sempre que todas as pré-condições são satisfeitas e nenhuma pós-condição é satisfeita. Os marcadores se transferem das pré-condições para as pós-





4) Foram utilizados ainda os elementos box temporizador , box capacidade e box agrupador. O box temporizador solta em um intervalo de tempo pré-determinado Δt uma marca ao sistema. O box capacidade possui uma capacidade de armazenamento de marcas indicada pelo subíndice N e o box agrupador recebe N marcas antes de efetuar um disparo. O número de marcas atual é indicado por n . Os arcos ligados a boxes capacidade e agrupador podem possuir pesos associados.



Apêndice II

Planihas de Análise dos Parâmetros
e Estudo da Mola Protótipo

Planilha de Análise dos Parâmetros

P	$\Delta\theta$	$\Delta\theta$	R	M
1	360,0	2160,0	0,00048	0,0029
2	180,0	1080,0	0,00095	0,0057
3	120,0	720,0	0,00143	0,0086
4	90,0	540,0	0,00191	0,0115
5	72,0	432,0	0,00239	0,0143
6	60,0	360,0	0,00286	0,0172
7	51,4	308,6	0,00334	0,0201
8	45,0	270,0	0,00382	0,0229
9	40,0	240,0	0,00430	0,0258
10	36,0	216,0	0,00477	0,0286
11	32,7	196,4	0,00525	0,0315
12	30,0	180,0	0,00573	0,0344
13	27,7	166,2	0,00621	0,0372
14	25,7	154,3	0,00668	0,0401
15	24,0	144,0	0,00716	0,0430

P	$\Delta\theta$	$\Delta\theta$	R	M
1	360,0	2160,0	0,00048	0,0029
2	180,0	1080,0	0,00095	0,0057
3	120,0	720,0	0,00143	0,0086
4	90,0	540,0	0,00191	0,0115
5	72,0	432,0	0,00239	0,0143
6	60,0	360,0	0,00286	0,0172
7	51,4	308,6	0,00334	0,0201
8	45,0	270,0	0,00382	0,0229
9	40,0	240,0	0,00430	0,0258
10	36,0	216,0	0,00477	0,0286
11	32,7	196,4	0,00525	0,0315
12	30,0	180,0	0,00573	0,0344
13	27,7	166,2	0,00621	0,0372
14	25,7	154,3	0,00668	0,0401
15	24,0	144,0	0,00716	0,0430

I raçao - I (kgf)
 Coef. de funcionamento - f (adim.)
 Tensão de funcionamento - T^*f (kgf)
 Curso total do cabo - ΔL (m)
 Número de marchas - n
 Cte de projeto - $C_p = M^* \Delta L / (n-1)$ (kgf.m)
 Número de pinos - p
 Raio do carretel - R (m)
 Curso do carretel - $\Delta\theta$ (graus)
 Curso por marcha - $\Delta\theta$ (graus)
 Momento mínimo da mola - M (kgf.m)
 Cte elástica da mola p/ m unidades n° - k_{m-n° (kgf.m/rad)
 Pré-torção necessária p/ que se obtenha M (rad)
 Pós-torção atingida ao se armazenarem m unidades (rad)

K10-10% (8.0kgf)	Pré-torção	Pós-torção	K10-30% (7.8kgf)	Pré-torção	Pós-torção	K10-40% (8.4kgf)	Pré-torção	Pós-torção	K10-50% (8.0kgf)	Pré-torção	Pós-torção
0,00000	628,3	661,2	0,00001	314,2	377,0	0,00002	157,1	219,9	0,00002	125,7	188,5
0,00002	314,2	345,6	0,00004	157,1	188,5	0,00007	78,5	110,0	0,00009	62,8	94,2
0,00004	209,4	230,4	0,00008	104,7	125,7	0,00016	52,4	73,3	0,00021	41,9	62,8
0,00007	157,1	172,8	0,00015	78,5	94,2	0,00022	39,3	55,0	0,00036	31,4	47,1
0,00011	125,7	138,2	0,00023	62,8	75,4	0,00046	31,4	44,0	0,00057	25,1	37,7
0,00016	104,7	115,2	0,00033	52,4	62,8	0,00086	22,2	36,7	0,00082	20,9	31,4
0,00022	89,8	98,7	0,00045	44,9	53,9	0,00089	22,4	31,4	0,00112	18,0	26,9
0,00029	78,5	86,4	0,00058	39,3	47,1	0,00117	19,6	27,5	0,00148	15,7	23,8
0,00037	69,8	76,8	0,00074	34,9	41,9	0,00148	17,5	24,4	0,00185	14,0	20,9
0,00048	62,8	69,1	0,00091	31,4	37,7	0,00182	15,7	22,0	0,00228	12,6	18,8
0,00055	57,1	62,8	0,00110	28,6	34,3	0,00221	14,3	20,0	0,00276	11,4	17,1
0,00066	52,4	57,6	0,00131	26,2	31,4	0,00263	13,1	18,3	0,00328	10,5	15,7
0,00077	49,3	53,2	0,00154	24,2	29,0	0,00308	12,1	16,9	0,00385	9,7	14,5
0,00089	44,9	49,4	0,00179	22,4	26,9	0,00357	11,2	15,7	0,00447	9,0	13,5
0,00103	41,9	46,1	0,00205	20,9	25,1	0,00410	10,5	14,7	0,00513	8,4	12,6
Ka-10% (8.8kgf)	Pré-torção	Pós-torção	Ka-30% (7.2kgf)	Pré-torção	Pós-torção	Ka-40% (8.4kgf)	Pré-torção	Pós-torção	Ka-50% (8.0kgf)	Pré-torção	Pós-torção
0,00001	502,7	552,9	0,00001	251,3	301,6	0,00002	125,7	175,9	0,00003	100,5	150,8
0,00002	251,3	276,5	0,00005	125,7	160,8	0,00009	62,8	88,0	0,00011	50,3	75,4
0,00005	167,6	184,3	0,00010	83,8	100,5	0,00021	41,9	58,6	0,00026	33,5	50,3
0,00009	125,7	136,2	0,00018	62,8	75,4	0,00036	31,4	44,0	0,00046	25,1	37,7
0,00014	100,5	110,6	0,00028	50,3	60,3	0,00057	25,1	35,2	0,00071	20,1	30,2
0,00021	83,8	92,2	0,00041	41,9	50,3	0,00082	20,9	29,3	0,00103	16,8	25,1
0,00028	71,8	79,0	0,00056	35,9	43,1	0,00112	18,0	25,1	0,00140	14,4	21,5
0,00036	62,8	69,1	0,00073	31,4	37,7	0,00146	15,7	22,0	0,00182	12,6	18,8
0,00046	56,9	61,4	0,00092	27,9	33,5	0,00185	14,0	19,5	0,00231	11,2	16,8
0,00057	50,3	55,3	0,00114	25,1	30,2	0,00228	12,6	17,6	0,00285	10,1	15,1
0,00069	45,7	50,3	0,00138	22,8	27,4	0,00276	11,4	16,0	0,00345	9,1	13,7
0,00082	41,9	46,1	0,00164	20,9	25,1	0,00328	10,5	14,7	0,00410	8,4	12,6
0,00096	38,7	42,5	0,00193	19,3	23,2	0,00385	9,7	13,5	0,00482	7,7	11,6
0,00112	35,9	39,5	0,00223	18,0	21,5	0,00447	9,0	12,6	0,00559	7,2	10,8
0,00128	33,5	36,9	0,00256	16,8	20,1	0,00513	8,4	11,7	0,00641	6,7	10,1

K6-50% (6.5kg)	Pré-torção	Pós-torção
0,00001	585,5	622,0
0,00002	282,7	339,3
0,00004	141,4	169,6
0,00006	94,2	113,1
0,00008	70,7	84,8
0,00010	56,5	67,9
0,00013	42,4	51,5
0,00016	33,9	40,7
0,00018	28,3	34,4
0,00020	24,2	29,9
0,00025	18,8	23,6
0,00032	14,1	17,7
0,00041	11,3	14,1
0,00051	9,4	11,3
0,00061	8,7	10,9
0,00073	8,1	10,1
0,00086	7,5	9,4
0,00099	7,5	8,8
0,00114	7,5	8,8

K6-50% (6.5kg)	Pré-torção	Pós-torção
0,00002	141,4	187,9
0,00008	70,7	99,0
0,00018	47,1	66,0
0,00032	35,3	49,5
0,00051	28,3	39,6
0,00073	23,6	33,0
0,00099	20,2	28,3
0,00130	17,7	24,7
0,00164	15,7	22,0
0,00203	14,1	19,8
0,00245	12,9	18,0
0,00292	11,8	16,5
0,00342	10,9	15,2
0,00397	10,1	14,1
0,00456	9,4	13,2

K6-30% (7.2kg)	Pré-torção	Pós-torção
0,00002	188,5	245,0
0,00006	94,2	122,5
0,00014	62,8	81,7
0,00024	47,1	61,3
0,00038	37,7	49,0
0,00055	31,4	40,8
0,00074	26,9	35,0
0,00097	23,6	30,6
0,00123	20,9	27,2
0,00152	18,8	24,5
0,00184	17,1	22,3
0,00219	15,7	20,4
0,00257	14,5	18,8
0,00298	13,5	17,5
0,00342	12,6	16,3

K6-30% (7.2kg)	Pré-torção	Pós-torção
0,00001	282,7	339,3
0,00004	141,4	169,6
0,00009	94,2	113,1
0,00016	70,7	84,8
0,00025	56,5	67,9
0,00036	47,1	56,5
0,00050	40,4	48,5
0,00065	35,3	42,4
0,00082	31,4	37,7
0,00101	28,3	33,9
0,00123	25,7	30,8
0,00146	23,6	28,3
0,00171	21,7	26,1
0,00199	20,2	24,2
0,00228	18,8	22,6

K6-10% (6.5kg)	Pré-torção	Pós-torção
0,00001	585,5	622,0
0,00002	282,7	311,0
0,00006	141,4	155,5
0,00013	94,2	103,7
0,00018	70,7	84,8
0,00025	56,5	67,9
0,00032	42,4	51,5
0,00041	33,9	40,7
0,00051	28,3	34,4
0,00061	24,2	29,9
0,00073	20,2	24,7
0,00086	17,7	22,0
0,00099	15,7	19,8
0,00114	14,1	18,0

K7-50% (9.0kg)	Pré-torção	Pós-torção
0,00003	113,1	189,6
0,00010	56,5	84,8
0,00023	37,7	56,5
0,00041	28,3	42,4
0,00063	22,6	33,9
0,00091	18,8	28,3
0,00124	16,2	24,2
0,00162	14,1	21,2
0,00205	12,6	18,8
0,00253	11,3	17,0
0,00306	10,3	15,4
0,00365	9,4	14,1
0,00428	8,7	13,0
0,00496	8,1	12,1
0,00570	7,5	11,3

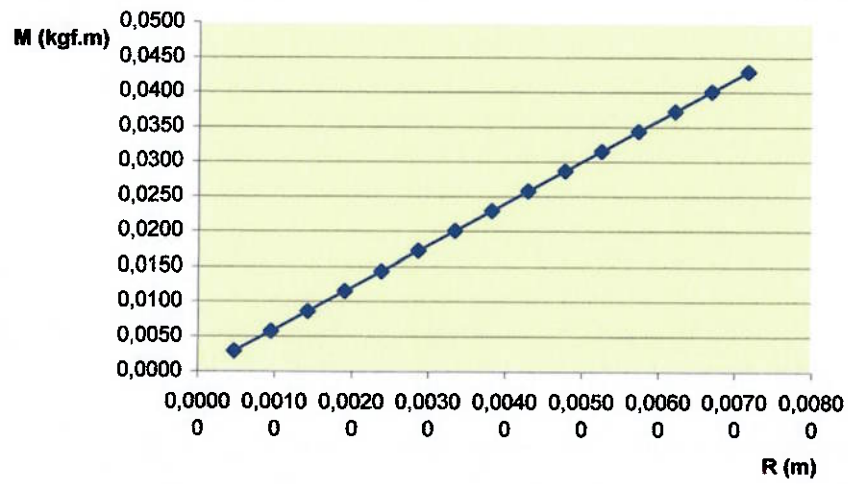
K7-50% (9.0kg)	Pré-torção	Pós-torção
0,00003	113,1	189,6
0,00010	56,5	84,8
0,00023	37,7	56,5
0,00042	27,5	38,5
0,00065	22,0	30,8
0,00094	18,3	25,7
0,00128	15,7	22,0
0,00167	13,7	19,2
0,00211	12,2	17,1
0,00261	11,0	15,4
0,00315	10,0	14,0
0,00375	9,2	12,8
0,00440	8,5	11,8
0,00511	7,9	11,0
0,00586	7,3	10,3

K7-30% (7.2kg)	Pré-torção	Pós-torção
0,00002	146,8	180,6
0,00008	73,3	95,3
0,00018	49,9	63,5
0,00031	36,7	47,6
0,00049	29,3	38,1
0,00070	24,4	31,8
0,00096	20,9	27,2
0,00125	18,3	23,8
0,00158	16,3	21,2
0,00195	14,7	19,1
0,00236	13,3	17,3
0,00281	12,2	15,9
0,00330	11,3	14,7
0,00383	10,5	13,6
0,00440	9,8	12,7

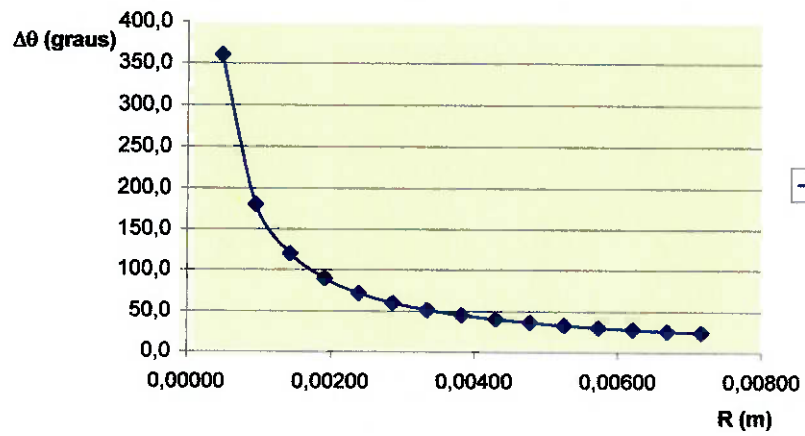
K7-30% (7.2kg)	Pré-torção	Pós-torção
0,00001	219,9	283,9
0,00005	110,0	131,9
0,00012	73,3	88,0
0,00021	55,0	66,0
0,00033	44,0	52,8
0,00047	36,7	44,0
0,00064	31,4	37,7
0,00083	27,5	33,0
0,00106	24,4	29,3
0,00130	22,0	26,4
0,00158	20,0	24,0
0,00188	18,3	22,0
0,00220	16,9	20,3
0,00255	15,7	18,8
0,00293	14,7	17,6

K7-10% (6.5kg)	Pré-torção	Pós-torção
0,00001	439,8	483,8
0,00003	219,9	241,9
0,00006	146,6	161,3
0,00010	110,0	121,0
0,00016	88,0	96,8
0,00023	73,3	80,6
0,00032	62,8	69,1
0,00042	55,0	60,5
0,00053	48,9	53,8
0,00065	44,0	48,4
0,00079	40,0	44,0
0,00094	36,7	40,3
0,00110	33,8	37,2
0,00128	31,4	34,6
0,00147	29,3	32,3

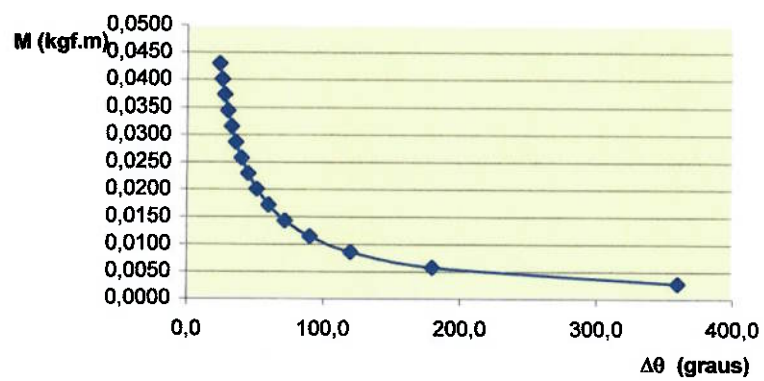
M x R



$\Delta\theta \times R$



M x $\Delta\theta$ ($M=Cp/\Delta\theta$)



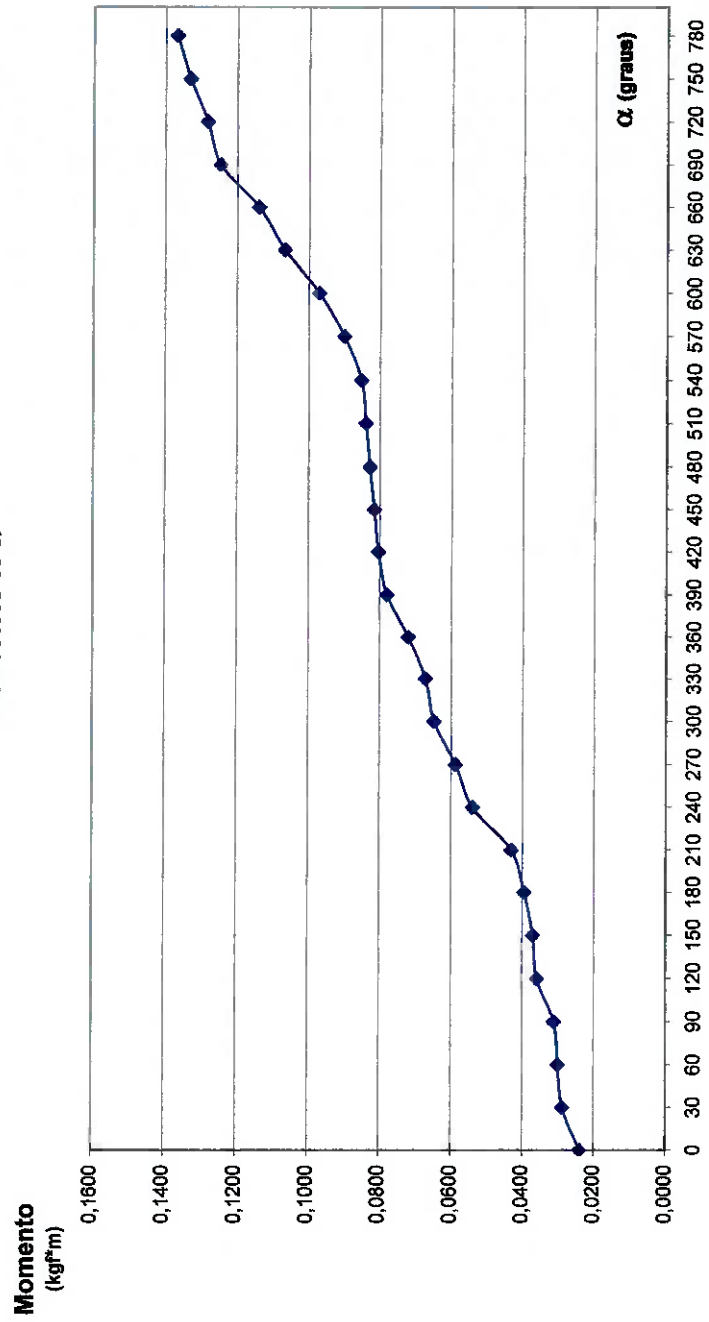
Planilha de Estudo da Mola Protótipo

P	Mo	200% de Mo	m~	300% de Mo	m~	400% de Mo	m~
8	0,0229	0,0458	5	0,0688	7	0,0917	13
9	0,0258	0,0516	5	0,0773	8	0,1031	14
10	0,0286	0,0573	6	0,0859	14	0,1146	18
11	0,0315	0,0630	6	0,0945	15	0,1261	18
12	0,0344	0,0688	7	0,1031	16	0,1375	22

Diametro da			
Força (kgf)	Mola * (mm)	α (graus)	Momento (kgf.m)
2,0	69	0	0,0240
2,4	65	30	0,0288
2,5	64	60	0,0300
2,6	63	90	0,0312
3,0	61	120	0,0360
3,1	60	150	0,0372
3,3	60	180	0,0396
3,6	59	210	0,0432
4,5	59	240	0,0540
4,9	58	270	0,0588
5,4	58	300	0,0648
5,6	57	330	0,0672
6,0	56	360	0,0720
6,5	55	390	0,0780
6,7	53	420	0,0804
6,8	52	450	0,0816
6,9	51	480	0,0828
7,0	50	510	0,0840
7,1	50	540	0,0852
7,5	49	570	0,0900
8,1	48	600	0,0972
8,9	48	630	0,1068
9,5	47	660	0,1140
10,4	46	690	0,1248
10,7	46	720	0,1284
11,1	45	750	0,1332
11,4	44	780	0,1368

R (m)	0,012
α (graus) Posição angular em relação àquela de Mo	
m~ Número aprox. de trocas de marcha armazenadas	
Mo(8 pinos)	0,0229
Mo(9 pinos)	0,0258
Mo(10 pinos)	0,0286
Mo(11 pinos)	0,0315
Mo(12 pinos)	0,0344
* mola livre (pode ser menor)	

Momento x α



Apêndice III

Listagem dos Programas Relacionados

Constam nesse apêndice as listagens dos dois programas elaborados para a implementação da lógica de controle do sistema.

Ambos são uma adaptação do MFG elaborado para a simulação do comportamento do sistema. Os programas tiveram como parâmetro de projeto uma abordagem que procurasse transcrever as características de uma rede de Petri, notadamente o assincronismo, para linguagens de programação sequenciais.

O programa em Visual Basic tem como intenção mostrar de forma visual a dinâmica de comportamento do sistema, ilustrando-a com ferramentas como a elaboração de gráficos de evolução das principais variáveis em tempo real. A característica de direcionamento a eventos dessa linguagem torna a transcrição de um MFG a ela mais natural.

No entanto, para o caso de o Controlador Programável implementado for um microprocessador, um programa desenvolvido nessa linguagem é inútil, pois a maioria deles compilam programas em linguagens de mais baixo nível, como C. A transcrição de uma rede de Petri para C pode sofrer muita perda de fidelidade, por não simular os assincronismos existentes da forma esperada. Escreveu-se um programa em C que minimizasse a ocorrência desses problemas, mantendo a fidelidade ao MFG de origem.

Listagem I - Programa em Visual Basic

'Declarações de Constantes Variáveis e Estruturas; Inicializações'

Option Explicit

```
Const BAIXO As Integer = 0
Const CIMA As Integer = 1
Const NAOMUDA As Integer = 2
Const TRAVADO As Boolean = False
Const DESTRAVADO As Boolean = True
Const PRINCIPAL As Boolean = False
Const MUDANCA As Boolean = True
```

```
Dim BPM As Integer
Dim RPM As Integer
Dim dRPM As Integer
Dim Marcha As Integer
Dim Modo As String
Dim estado_funcionalidade(3) As Boolean
Dim Limiar_treinamento As Integer
Dim Limite_Treinamento As Integer
Dim RPM_Set_1 As Integer
Dim RPM_Set_2 As Integer
Dim RPM_Media_1 As Integer
Dim RPM_Media_2 As Integer
Dim botao_Baixo As Boolean
Dim botao_Cima As Boolean
Dim flag(4) As Boolean
Dim alteracao As Boolean
Dim alterando As Integer
Dim altera_mais As Boolean
Dim altera_menos As Boolean
Dim RPM_Hist(16) As Integer
Dim BPM_Hist(16) As Integer
```

```
Private Type cicloPrincipal
    marcha_atual As Boolean
    apaga_LED_Verde As Boolean
    acende_LED_Vermelho As Boolean
    mudanca_efetuada As Boolean
    fim_ciclo As Boolean
    chave_dos_ciclos As Boolean
    delay As Integer
End Type
```

```
Private Type cicloMudanca
    mudanca_solicitada As Boolean
    botao_acionado As Boolean
End Type
```

```
Private Type cicloFuncionalidade
    estado_inicial As Boolean
    OK As Boolean
    NO As Boolean
    box_acumulador As Integer
End Type
```

```

Private Type cicloNavegador
    opcao As Integer
End Type

```

```

Dim cp As cicloPrincipal
Dim cm As cicloMudanca
Dim cf(3) As cicloFuncionalidade
Dim cn As cicloNavegador

```

```

Private Sub Form_Load()
    BPM = 110
    RPM = 80
    Marcha = 1
    Modo = "Manual"
    estado_funcionalidade(0) = False
    estado_funcionalidade(1) = False
    estado_funcionalidade(2) = False
    estado_funcionalidade(3) = False
    Limiar_treinamento = 130
    Limite_Treinamento = 160
    RPM_Set_1 = 90
    RPM_Set_2 = 120
    RPM_Media_1 = 0
    RPM_Media_2 = 0
    flag(0) = True
    flag(1) = True
    flag(2) = True
    flag(3) = True
    flag(4) = True
    alteracao = False
    altera_mais = False
    altera_menos = False
    alterando = 1

```

```

    cn.opcao = NAOMUDA
    Timer_Mudanca_1.Enabled = False
    cp.marcha_atual = True
    cp.apaga_LED_Verde = False
    cp.mudanca_efetuada = False
    cp.fim_ciclo = False
    cp.chave_dos_ciclos = MUDANCA
    cp.delay = 0
    cm.mudanca_solicitada = False
    cm.botao_acionado = False
    cf(0).box_acumulador = 0
    cf(0).estado_inicial = True
    cf(0).NO = False
    cf(0).OK = False
    cf(1).box_acumulador = 0
    cf(1).estado_inicial = True
    cf(1).NO = False
    cf(1).OK = False
    cf(2).box_acumulador = 0
    cf(2).estado_inicial = True
    cf(2).NO = False
    cf(2).OK = False
    cf(3).box_acumulador = 0

```

```
cf(3).estado_inicial = True
cf(3).NO = False
cf(3).OK = False
```

```
lblBPM1 = Limiar_treinamento
lblBPM2 = Limite_Treinamento
lblRPM1 = RPM_Set_1
lblRPM2 = RPM_Set_2
Timer_alterando.Enabled = False
lblValorRotacao = RPM
lblValorBatimentos = BPM
End Sub
```

```
Private Sub cbFunc1_Click()

If estado_funcionalidade(0) = False Then
    estado_funcionalidade(0) = True
Else
    estado_funcionalidade(0) = False
End If
End Sub
```

```
Private Sub cbFunc2_Click()

If estado_funcionalidade(1) = False Then
    estado_funcionalidade(1) = True
Else
    estado_funcionalidade(1) = False
End If
End Sub
```

```
Private Sub cbFunc3_Click()

If estado_funcionalidade(2) = False Then
    estado_funcionalidade(2) = True

Else
    estado_funcionalidade(2) = False
End If
```

```
End Sub
```

```
Private Sub cbFunc4_Click()

If estado_funcionalidade(3) = False Then
    estado_funcionalidade(3) = True
Else: estado_funcionalidade(3) = False
End If
End Sub
```

```
Private Sub cbSimulador_Resp_Click()
If sm.sim_resp = False Then
```

```

        sm.sim_resp = True
Else: sm.sim_resp = False
End If

End Sub

Private Sub cmdAlterar_Click()
If Modo = "Manual" Then
    If alteracao = False Then
        alteracao = True
        Timer_alterando.Enabled = True

        Else: alterando = alterando + 1
    End If

Select Case alterando
    Case 1
        lblRPM1.BorderStyle = 0
    Case 2
        lblRPM1.BorderStyle = 1
        lblRPM2.BorderStyle = 0
    Case 3
        lblBPM1.BorderStyle = 0
        lblRPM2.BorderStyle = 1
    Case 4
        lblBPM1.BorderStyle = 1
        lblBPM2.BorderStyle = 0
    Case 5
        lblBPM2.BorderStyle = 1
End Select

If alterando = 5 Then
    alterando = 1
    alteracao = False
    Timer_alterando.Enabled = False
End If
End If
End Sub

Private Sub cmdBPMMais_Click()
BPM = BPM + 1
lblValorBatimentos.Caption = BPM
End Sub

Private Sub cmdBPMMais5_Click()

BPM = BPM + 5
lblValorBatimentos.Caption = BPM

End Sub

Private Sub cmdBPMMenos_Click()

BPM = BPM - 1
lblValorBatimentos.Caption = BPM

End Sub

```

```

Private Sub cmdBPMMenos5_Click()

BPM = BPM - 5
lblValorBatimentos.Caption = BPM

End Sub

Private Sub cmdMarchaMais_Click()

If alteracao = False Then
botao_Cima = True
cn.opcao = CIMA
Else
altera_mais = True
End If

End Sub

Private Sub cmdMarchaMenos_Click()

If alteracao = False Then
botao_Baixo = True
cn.opcao = BAIXO
Else
altera_menos = True
End If

End Sub

Private Sub cmdRPMMais_Click()

RPM = RPM + 1
lblValorRotacao.Caption = RPM

End Sub

Private Sub cmdRPMMais5_Click()

RPM = RPM + 5
lblValorRotacao.Caption = RPM

End Sub

Private Sub cmdRPMMenos_Click()

RPM = RPM - 1
lblValorRotacao.Caption = RPM

End Sub

Private Sub cmdRPMMenos5_Click()

RPM = RPM - 5
lblValorRotacao.Caption = RPM

End Sub

```



```

'Rotinas de Plotagem de Gráficos em tempo real'
Private Sub Grafico_Batimentos_Timer()
Dim a As Integer

Batimentos.Column = 1
For a = 0 To 15
Batimentos.Row = a + 1
Batimentos.Data = BPM_Hist(a)
Next a

Batimentos.Column = 2
For a = 0 To 15
Batimentos.Row = a + 1
Batimentos.Data = Limiar_treinamento
Next a

Batimentos.Column = 3
For a = 0 To 15
Batimentos.Row = a + 1
Batimentos.Data = Limite_Treinamento
Next a
End Sub
Private Sub Grafico_Timer()
Dim a As Integer

Rotacao.Column = 1
For a = 0 To 15
Rotacao.Row = a + 1
Rotacao.Data = RPM_Hist(a)
Next a

If estado_funcionalidade(3) = False Then
Rotacao.Column = 2
For a = 0 To 15
Rotacao.Row = a + 1
Rotacao.Data = RPM_Set_1
Next a

Rotacao.Column = 3
For a = 0 To 15
Rotacao.Row = a + 1
Rotacao.Data = RPM_Set_2
Next a
End If

If estado_funcionalidade(3) = True Then
Rotacao.Column = 2
For a = 0 To 15
Rotacao.Row = a + 1
Rotacao.Data = RPM_Media_1
Next a

Rotacao.Column = 3
For a = 0 To 15
Rotacao.Row = a + 1
Rotacao.Data = RPM_Media_2
Next a
End If

```

End Sub

'Rotina de Seleção de Modo'

Private Sub optModo_Click(Index As Integer)

If alteracao = False Then

Modo = optModo(Index).Caption

If Modo = "Automatico" Then

Timer_Mudanca_1.Enabled = True

Timer_Mudanca_2.Enabled = True

Timer_Mudanca_3.Enabled = True

Timer_Mudanca_4.Enabled = True

End If

If Modo = "Manual" Then

Timer_Mudanca_1.Enabled = False

Timer_Mudanca_2.Enabled = False

Timer_Mudanca_3.Enabled = False

Timer_Mudanca_4.Enabled = False

If picLEDVerde(0).Visible = True Then picLEDVerde(0).Visible

= False

If picLEDVerde(1).Visible = True Then picLEDVerde(1).Visible

= False

End If

End If

End Sub

'Rotinas de Alteração de Parâmetros'

Private Sub Timer_alterando_Timer()

If alteracao = True Then

Select Case alterando

Case 1

If altera_mais = True Then

RPM_Set_1 = RPM_Set_1 + 5

altera_mais = False

End If

If altera_menos = True And RPM_Set_1 > 5 Then

RPM_Set_1 = RPM_Set_1 - 5

lblRPM1 = RPM_Set_1

altera_menos = False

End If

Case 2

If RPM_Set_2 < RPM_Set_1 Then

RPM_Set_2 = RPM_Set_1

lblRPM2 = RPM_Set_2

End If

If altera_mais = True Then

RPM_Set_2 = RPM_Set_2 + 5

lblRPM2 = RPM_Set_2

altera_mais = False

End If

If altera_menos = True And RPM_Set_2 > RPM_Set_1 + 5 Then

```

        RPM_Set_2 = RPM_Set_2 - 5
        lblRPM2 = RPM_Set_2
        altera_menos = False
    End If

    Case 3
    If altera_mais = True Then
        Limiar_treinamento = Limiar_treinamento + 5
        lblBPM1 = Limiar_treinamento
        altera_mais = False
    End If
    If altera_menos = True And Limiar_treinamento > 5 Then
        Limiar_treinamento = Limiar_treinamento - 5
        lblBPM1 = Limiar_treinamento
        altera_menos = False
    End If
    Case 4
    If Limite_Treinamento < Limiar_treinamento Then
        Limite_Treinamento = Limiar_treinamento
        lblBPM2 = Limite_Treinamento
    End If

    If altera_mais = True Then
        Limite_Treinamento = Limite_Treinamento + 5
        lblBPM2 = Limite_Treinamento
        altera_mais = False
    End If
    If altera_menos = True And Limite_Treinamento >
Limiar_treinamento + 5 Then
        Limite_Treinamento = Limite_Treinamento - 5
        lblBPM2 = Limite_Treinamento
        altera_menos = False
    End If
    End Select

End If

End Sub

'Rotinas de Cálculo e Atualização das médias de RPM e BPM em tempo
real'

Private Sub Timer_BPM_Hist_Timer()
    Static i As Integer
    Static a As Integer
    Dim Media_BPM As Integer
    Dim Soma_BPM As Integer
    Soma_BPM = 0

    If i < 16 Then
        BPM_Hist(i) = BPM
        i = i + 1
    End If

    If i = 16 Then
        For a = 0 To 15
            BPM_Hist(a) = BPM_Hist(a + 1)
        Next a
        If BPM_Hist(16) <> 0 Then BPM_Hist(15) = BPM_Hist(16)
        BPM_Hist(16) = BPM
    End If
End Sub

```

```

    Next a
End If

For a = 0 To i
    Soma_BPM = (Soma_BPM + BPM_Hist(a))
Next a

If i < 16 Then
    Media_BPM = Soma_BPM / i
Else: Media_BPM = Soma_BPM / 17
End If

End Sub

Private Sub Timer_RPM_Hist_Timer()

Static i As Integer
Static a As Integer
Dim Media_RPM As Integer
Dim Soma_RPM As Integer
Soma_RPM = 0

If i < 16 Then
    RPM_Hist(i) = RPM
    i = i + 1
End If

If i = 16 Then
    For a = 0 To 15
        RPM_Hist(a) = RPM_Hist(a + 1)
        If RPM_Hist(16) <> 0 Then RPM_Hist(15) = RPM_Hist(16)
        RPM_Hist(16) = RPM
    Next a
End If

For a = 0 To i
    Soma_RPM = (Soma_RPM + RPM_Hist(a))
Next a

If i < 16 Then
    Media_RPM = Soma_RPM / i
Else: Media_RPM = Soma_RPM / 17
End If

RPM_Media_2 = 1.05 * Media_RPM
RPM_Media_1 = 0.95 * Media_RPM

End Sub

'Rotinas temporizadas que simulam os ciclos esquematizados no MFG'

Private Sub Timer_CP_Timer()

If flag(0) = False Then flag(0) = True

```

```

If cp.marcha_atual = True And cm.mudanca_solicitada = True And
flag(0) = True Then
    cp.marcha_atual = False
    cp.acende_LED_Vermelho = True
    picLEDVermelho.Visible = True
    cp.chave_dos_ciclos = PRINCIPAL
    flag(0) = False

End If

If cp.acende_LED_Vermelho = True And flag(0) = True Then
    cp.delay = cp.delay + 1
    If cp.delay = 6 Then
        cp.acende_LED_Vermelho = False
        cp.mudanca_efetuada = True
        Call Navegador
        picLEDVermelho.Visible = False
        cp.delay = 0
        flag(0) = False
    End If
End If

If cp.mudanca_efetuada = True And flag(0) = True Then
    cp.mudanca_efetuada = False
    cp.fim_ciclo = True
    flag(0) = False
End If

If cp.fim_ciclo = True And flag(0) = True Then
    cp.fim_ciclo = False
    cm.mudanca_solicitada = False
    cp.chave_dos_ciclos = MUDANCA
    cp.marcha_atual = True
    flag(0) = False
End If

End Sub

Private Sub Timer_LED_Verde_Timer()

If cf(0).box_acumulador > 0 Or cf(1).box_acumulador > 0 Or
cf(2).box_acumulador > 0 Then
    picLEDVerde(1).Visible = True
Else
    picLEDVerde(1).Visible = False
End If

If cf(3).box_acumulador >= 2 Then
    picLEDVerde(0).Visible = True
Else
    picLEDVerde(0).Visible = False
End If

End Sub

Private Sub Timer_Mudanca_1_Timer()
If flag(1) = False Then flag(1) = True

```



```

If estado_funcionalidade(0) = False Or BPM >= Limiar_treinamento
Then cf(0).box_acumulador = 0

If cf(0).estado_inicial = True And estado_funcionalidade(0) = True
And cp.chave_dos_ciclos = MUDANCA And flag(1) = True Then
    cf(0).estado_inicial = False
    If BPM < Limiar_treinamento Then
        cf(0).OK = True
        cf(0).NO = False
    Else
        cf(0).NO = True
        cf(0).OK = False
    End If
    flag(1) = False
End If

If cf(0).OK = True And flag(1) = True Then
    cf(0).OK = False
    cf(0).estado_inicial = True
    cf(0).box_acumulador = cf(0).box_acumulador + 1

    If cf(0).box_acumulador > 6 And Marcha < 7 And flag(1) = True
Then
        cm.mudanca_solicitada = True
        cn.opcao = CIMA
        cf(0).box_acumulador = 0
    End If

    flag(1) = False
End If

If cf(0).NO = True And flag(1) = True Then
    cf(0).NO = False
    cf(0).estado_inicial = True
    cf(0).box_acumulador = 0
    flag(1) = False
End If

End Sub

Private Sub Timer_Mudanca_2_Timer()
If flag(2) = False Then flag(2) = True

If estado_funcionalidade(1) = False Or BPM <= Limite_Treinamento
Then cf(1).box_acumulador = 0

If cf(1).estado_inicial = True And estado_funcionalidade(1) = True
And cp.chave_dos_ciclos = MUDANCA And flag(2) = True Then
    cf(1).estado_inicial = False
    If BPM > Limite_Treinamento Then
        cf(1).OK = True
        cf(1).NO = False
    Else
        cf(1).NO = True

```

```

        cf(1).OK = False
    End If
    flag(2) = False
End If

    cf(1).OK = False
    cf(1).estado_inicial = True
    cf(1).box_acumulador = cf(1).box_acumulador + 1

    If cf(1).box_acumulador > 6 And Marcha > 1 And flag(2) = True
Then
        cm.mudanca_solicitada = True
        cn.opcao = BAIXO
        cf(1).box_acumulador = 0
    End If

    flag(2) = False
End If

    If cf(1).NO = True And flag(2) = True Then
        cf(1).NO = False
        cf(1).estado_inicial = True
        cf(1).box_acumulador = 0
        flag(2) = False
    End If

End Sub

Private Sub Timer_Mudanca_3_Timer()
    If flag(3) = False Then flag(3) = True

    If estado_funcionalidade(2) = False Or (RPM > RPM_Set_1 And RPM <
RPM_Set_2) Then cf(2).box_acumulador = 0

    If cf(2).estado_inicial = True And estado_funcionalidade(2) = True
And cp.chave_dos_ciclos = MUDANCA And flag(3) = True Then
        cf(2).estado_inicial = False
        If RPM < RPM_Set_1 Or RPM > RPM_Set_2 Then
            cf(2).OK = True
            cf(2).NO = False
        Else
            cf(2).NO = True
            cf(2).OK = False
        End If
        flag(3) = False
    End If

    If cf(2).OK = True And flag(3) = True Then
        cf(2).OK = False
        cf(2).estado_inicial = True
        cf(2).box_acumulador = cf(2).box_acumulador + 1
        If cf(2).box_acumulador > 6 And flag(3) = True Then
            If RPM < RPM_Set_1 And Marcha > 1 Then
                cn.opcao = BAIXO
                cf(2).box_acumulador = 0
            End If
        End If
    End If
End Sub

```

```

        cm.mudanca_solicitada = True
    End If
    If RPM > RPM_Set_2 And Marcha < 7 Then
        cn.opcao = CIMA
        cf(2).box_acumulador = 0
        cm.mudanca_solicitada = True
    End If
End If

flag(3) = False

End If

If cf(2).NO = True And flag(3) = True Then
    cf(2).NO = False
    cf(2).estado_inicial = True
    cf(2).box_acumulador = 0
    flag(3) = False
End If

End Sub

Private Sub Timer_Mudanca_4_Timer()
    If flag(4) = False Then flag(4) = True

    If estado_funcionalidade(3) = False Or (RPM > RPM_Media_1 And RPM <
    RPM_Media_2) Then cf(3).box_acumulador = 0

    If cf(3).estado_inicial = True And estado_funcionalidade(3) = True
    And cp.chave_dos_ciclos = MUDANCA And flag(4) = True Then
        cf(3).estado_inicial = False
        If RPM < RPM_Media_1 Or RPM > RPM_Media_2 Then
            cf(3).OK = True
            cf(3).NO = False
        Else
            cf(3).NO = True
            cf(3).OK = False
        End If
        flag(4) = False
    End If

    If cf(3).OK = True And flag(4) = True Then
        cf(3).OK = False
        cf(3).estado_inicial = True
        cf(3).box_acumulador = cf(3).box_acumulador + 1

        If cf(3).box_acumulador > 6 And flag(4) = True Then
            If RPM < RPM_Media_1 And Marcha > 1 Then
                cn.opcao = BAIXO
                cf(3).box_acumulador = 0
                cm.mudanca_solicitada = True
            End If
        End If
    End If
End Sub

```

```

End If
If RPM > RPM_Media_2 And Marcha < 7 Then
    cn.opcao = CIMA
    cf(3).box_acumulador = 0
    cm.mudanca_solicitada = True
End If
End If

    flag(4) = False
End If

If cf(3).NO = True And flag(4) = True Then
    cf(3).NO = False
    cf(3).estado_inicial = True
    cf(3).box_acumulador = 0
    flag(4) = False
End If

End Sub

Private Sub Timer_Mudanca_Manual_Timer()

If (botao_Baixo = True And Marcha > 1) Or (botao_Cima = True And
Marcha < 7) Then
    cm.mudanca_solicitada = True
    botao_Baixo = False
End If

End Sub

Public Sub Navegador()

If cn.opcao = BAIXO And Marcha > 1 Then
    Marcha = Marcha - 1
    lblValorMarcha = Marcha
    If sm.sim_resp = True Then sm.Mud_baixo = True
End If

If cn.opcao = CIMA And Marcha < 7 Then
    Marcha = Marcha + 1
    lblValorMarcha = Marcha
    If sm.sim_resp = True Then sm.Mud_Cima = True
End If

cn.opcao = NAOMUDA
End Sub

```

Listagem II - Programa em C

```
#include <stdio.h>
```

```
#define MANUAL 1
#define AUTOMATICO 0
#define ATIVADO 1
#define DESATIVADO 0
#define HIST_SIZE 50
#define N_MARCHAS 7
#define N_FUNC 4
#define N_TECLAS 17
#define ATIVA 1
#define DESATIVA 2
#define OK 1
#define NO 0
#define PRESS 1
#define SIM 1
#define B_BAIKO 0
#define B_CIMA 1
#define ACENDE 1
#define APAGA 0
#define APAGADO 0
#define ACESO 1
```

```
struct ciclista {
    char nome[20];
    int limiar_aerobico;
    int BPM;
    int BPM_hist[HIST_SIZE];
    int RPM;
    int RPM_hist[HIST_SIZE];
    int dRPM;
    int limiar_treinamento;
    int limite_treinamento;
    int valor_base_B;
    int valor_base_C;
    int rotacao_set;
};
```

/* As Estruturas a seguir são relacionadas cada uma a cada um dos ciclos definidos na representação em MFG. Basicamente, cada componente da estrutura representa um Box do MFG*/

```
struct Ciclo_1 {
    int ciclista_parado;
    int sistema_em_op;
    int deslig_solicitado;
    int marcha_atual;
    int envio_atuador;
    int acende_LED_Vermelho;
    int envio_navegador;
    int apaga_LED_Verde;
    int apaga_LED_Vermelho;
    int trava_ciclo_logica;
    int destrava_ciclo_logica;
    int mudanca_efetuada;
};
```

```

};

struct Ciclo_2 {
    int marcha[N_MARCHAS];
    unsigned int i;
};

struct Ciclo_3 {
    int botao_acionado;
    int mudanca_solicitada;
    int leitura_sensor[N_FUNC];
    int primeira_comparacao[N_FUNC];
    int nova_leitura_sensor[N_FUNC];
    int segunda_comparacao[N_FUNC];
    int estado_inicial[N_FUNC];
    int contando [N_FUNC];
    int resultado_comparacao[N_FUNC];
    int contador[N_FUNC];
    int envio_LED[N_FUNC];
};

struct ciclo_modos {
    int modo;
};

struct ciclo_funcionalidade {
    int estado_funcionalidade[N_FUNC];
};

struct botao{
    int on;
    int off;
    int mud_modos;
    int botao[2];
    int func[N_FUNC];
};

struct teclas{
    int tecla[N_TECLAS];
};

struct estado_LEDs{
    int LED_Verde;
    int LED_Vermelho;
};

struct ciclo_BC{
    int baixo;
    int cima;
};

```



```

    void init (struct Ciclo_1 *pointer_ciclo_p, struct Ciclo_2
*pointer_ciclo_s, struct Ciclo_3 *pointer_ciclo_B, struct Ciclo_3
*pointer_ciclo_C, struct ciclo_modos *pointer_ciclo_m, struct
ciclo_funcionalidade *pointer_ciclo_f, struct botao *pointer_botao,
struct estado_LEDs *pointer_estado_LEDs, struct ciclo_BC
*pointer_ciclo_BC);

    void fc_ciclo_modos (struct ciclo_modos *pointer_ciclo_modos,
struct botao *pointer_botao);

    void fc_ciclo_funcionalidade (struct ciclo_funcionalidade
*pointer_ciclo_f, struct botao *pointer_botao);

    void fc_ciclo_principal (struct Ciclo_1 *pointer_ciclo_p,
struct Ciclo_3 cb, struct Ciclo_3 cc, struct botao botoes, int
*mud_tela, struct estado_LEDs *pointer_estado_LEDs);

    void fc_ciclo_status (struct Ciclo_2 *pointer_ciclo_s, struct
Ciclo_1 cp, int *mud_tela, struct ciclo_BC cbc);

    void leitura_botoes (struct botao *pointer_botao, struct
teclas tc);

    void fc_ciclo_logica_mudanca (struct Ciclo_3 *pointer_ciclo_3,
struct botao *pointer_botao, struct ciclista usuario, struct Ciclo_1
cp, struct ciclo_modos cm, struct ciclo_funcionalidade cf, struct
Ciclo_2 cs, struct estado_LEDs *pointer_estado_LEDs, struct ciclo_BC
*pointer_ciclo_BC, int n);

    void leitura_sensor (struct ciclista *pointer_usuario, struct
teclas tc);

    void envio_atuador(void);

    void envio_LED_Vermelho(void);

    void envio_LED_Verde(void);

    int funcionalidade(int i, int opcao, struct ciclista usuario);

```

```

void main (void){

    struct ciclista usuario, *pointer_usuario;

    struct Ciclo_1 cp, *pointer_ciclo_p;

    struct Ciclo_2 cs, *pointer_ciclo_s;

    struct Ciclo_3 cb, *pointer_ciclo_B, cc, *pointer_ciclo_C;

    struct ciclo_modulo cm, *pointer_ciclo_m;

    struct botao botoes, *pointer_botao;

    struct teclas tc, *pointer_tecclas;

    struct ciclo_funcionalidade cf, *pointer_ciclo_f;

    struct estado_LEDs el, *pointer_estado_LEDs;

    struct ciclo_BC cbc, *pointer_ciclo_BC;

    pointer_ciclo_p= &cp;
    pointer_ciclo_s= &cs;
    pointer_ciclo_B= &cb;
    pointer_ciclo_C= &cc;
    pointer_botao= &botoes;
    pointer_tecclas= &tc;
    pointer_ciclo_m = &cm;
    pointer_ciclo_f = &cf;
    pointer_usuario = &usuario;
    pointer_estado_LEDs = &el;
    pointer_ciclo_BC = &cbc;
    mud_tela=1;

    init(pointer_ciclo_p, pointer_ciclo_s, pointer_ciclo_B,
    pointer_ciclo_C, pointer_ciclo_m, pointer_ciclo_f, pointer_botao,
    pointer_estado_LEDs, pointer_ciclo_BC);

    /*O assincronismo do MFG é representado nesse loop. Através das
    variáveis flag, dentro de cada uma das funções, garante-se que só
    uma transição ocorra a cada loop*/

    while (pointer_botao ->off==0){

        leitura_botoes(pointer_botao, tc);

        leitura_sensor(pointer_usuario, tc, &mud_tela);

        fc_ciclo_modulo(pointer_ciclo_m, pointer_botao);

        fc_ciclo_funcionalidade(pointer_ciclo_f, pointer_botao);
    }
}

```

```

        fc_ciclo_logica_mudanca(pointer_ciclo_B, pointer_botao,
        usuario, cp, cm, cf, cs, pointer_estado_LEDs, pointer_ciclo_BC,
        B_BAIXO);

        fc_ciclo_logica_mudanca(pointer_ciclo_C, pointer_botao,
        usuario, cp, cm, cf, cs, pointer_estado_LEDs, pointer_ciclo_BC,
        B_CIMA);

        fc_ciclo_principal(pointer_ciclo_p, cb, cc, botoes,
        pointer_estado_LEDs);

        fc_ciclo_status(pointer_ciclo_s, cp, cbc);

    }

}

void init (struct Ciclo_1 *pointer_ciclo_p, struct Ciclo_2
*pointer_ciclo_s, struct Ciclo_3 *pointer_ciclo_B, struct Ciclo_3
*pointer_ciclo_C, struct ciclo_modos *pointer_ciclo_m, struct
ciclo_funcionalidade *pointer_ciclo_f, struct botao *pointer_botao,
struct estado_LEDs *pointer_estado_LEDs, struct ciclo_BC
*pointer_ciclo_BC){

/*Função de Inicialização de Variáveis*/

int i;

pointer_ciclo_p ->ciclista_parado          =1;
pointer_ciclo_p ->sistema_em_op            =0;
pointer_ciclo_p ->deslig_solicitado        =0;
pointer_ciclo_p ->marcha_atual             =0;
pointer_ciclo_p ->envio_atuador            =0;
pointer_ciclo_p ->acende_LED_Vermelho     =0;
pointer_ciclo_p ->apaga_LED_Vermelho      =0;
pointer_ciclo_p ->apaga_LED_Verde         =0;
pointer_ciclo_p ->envio_navegador         =0;
pointer_ciclo_p ->trava_ciclo_logica       =0;
pointer_ciclo_p ->destrava_ciclo_logica    =1;
pointer_ciclo_p ->mudanca_efetuada        =0;
pointer_ciclo_s ->marcha[0]               =1;
for (i=1; i<N_MARCHAS; i++)
    pointer_ciclo_s ->marcha[i]            =0;
for (i=0; i<N_FUNC; i++){
    pointer_ciclo_B ->leitura_sensor[i]    =0;
    pointer_ciclo_B ->primeira_comparacao[i] =0;
    pointer_ciclo_B ->segunda_comparacao[i] =0;
    pointer_ciclo_B ->estado_inicial[i]     =1;
    pointer_ciclo_B ->resultado_comparacao[i] =0;
    pointer_ciclo_B ->nova_leitura_sensor[i] =0;
    pointer_ciclo_B ->envio_LED[i]          =0;
    pointer_ciclo_B ->contando[i]          =0;
    pointer_ciclo_B ->contador[i]          =0;
    pointer_ciclo_C ->leitura_sensor[i]    =0;
    pointer_ciclo_C ->primeira_comparacao[i] =0;
    pointer_ciclo_C ->segunda_comparacao[i] =0;
    pointer_ciclo_C ->estado_inicial[i]     =1;
    pointer_ciclo_C ->resultado_comparacao[i] =0;

```

```

    pointer_ciclo_C ->nova_leitura_sensor[i]           =0;
    pointer_ciclo_C ->envio_LED[i]                     =0;
    pointer_ciclo_C ->contando[i]                     =0;
    pointer_ciclo_C ->contador[i]                     =0;
    pointer_ciclo_f ->estado_funcionalidade[i]        =ATIVADO;

    pointer_botao ->func[i]                            =0;
}
pointer_ciclo_s ->i                                    =0;
pointer_ciclo_B ->botao_acionado                     =0;
pointer_ciclo_B ->mudanca_solicitada                 =0;

pointer_ciclo_C ->botao_acionado                     =0;
pointer_ciclo_C ->mudanca_solicitada                 =0;

pointer_ciclo_m ->modo                                =MANUAL;
pointer_botao -> on                                   =1;
pointer_botao ->off                                   =0;
pointer_botao ->mud_modos                             =0;
pointer_botao ->botao[B_BAIXO]                      =0;
pointer_botao ->botao[B_CIMA]                       =0;

pointer_estado_LEDs ->LED_Verde                      =APAGADO;
pointer_estado_LEDs ->LED_Vermelho                  =APAGADO;
pointer_ciclo_BC ->baixo                             =0;
pointer_ciclo_BC ->cima                             =0;

}

void fc_ciclo_principal (struct Ciclo_1 *pointer_ciclo_p, struct
Ciclo_3 cb, struct Ciclo_3 cc, struct botao botoes, int *mud_tela,
struct estado_LEDs *pointer_estado_LEDs){

    int flag;

    flag=0;

    if ( (pointer_ciclo_p ->ciclista_parado ==1) && (flag==0) &&
(botoes.on==1) ){
        pointer_ciclo_p ->ciclista_parado=0;
        pointer_ciclo_p ->sistema_em_op=1;
        pointer_ciclo_p ->marcha_atual=1;
        flag=1;
    }

    if( (pointer_ciclo_p ->marcha_atual==1) && (flag==0) && (
(cb.mudanca_solicitada==1) || (cc.mudanca_solicitada==1) ) &&
(pointer_ciclo_p ->destrava_ciclo_logica==1) ){
        if (pointer_estado_LEDs ->LED_Verde==ACESO){
            pointer_estado_LEDs ->LED_Verde=APAGADO;
            envio_LED_Verde(APAGA, 10);
        }
        pointer_ciclo_p ->marcha_atual=0;
        pointer_ciclo_p ->acende_LED_Vermelho=1;
        pointer_ciclo_p ->trava_ciclo_logica=1;
        pointer_ciclo_p ->destrava_ciclo_logica=0;
    }
}

```

```

        pointer_estado_LEDs ->LED_Vermelho=ACESO;
        envio_LED_Vermelho(ACENDE, 20);

        flag=1;
    }

    if( (pointer_ciclo_p ->acende_LED_Vermelho==1) && (flag==0) ){
        pointer_ciclo_p ->acende_LED_Vermelho=0;
        pointer_ciclo_p ->envio_atuador=1;
        envio_atuador();
        flag=1;
    }

    if( (pointer_ciclo_p ->envio_atuador==1) && (flag==0) ){
        pointer_ciclo_p ->envio_atuador=0;
        pointer_ciclo_p ->mudanca_efetuada=1;
        flag=1;
    }

    if( (pointer_ciclo_p ->mudanca_efetuada==1) && (flag==0) ){
        pointer_ciclo_p ->mudanca_efetuada=0;
        pointer_ciclo_p ->envio_navegador=1;
        *mud_tela=SIM;
        flag=1;
    }

    if( (pointer_ciclo_p ->envio_navegador==1) && (flag==0) ){
        pointer_ciclo_p ->envio_navegador=0;
        pointer_ciclo_p ->apaga_LED_Vermelho=1;
        envio_LED_Vermelho(APAGA, 50);
        pointer_estado_LEDs ->LED_Vermelho=APAGADO;
        pointer_ciclo_p ->marcha_atual=1;
        pointer_ciclo_p ->mudanca_efetuada=0;
        flag=1;
    }

    if( (pointer_ciclo_p ->apaga_LED_Vermelho==1) && (flag==0) ){
        pointer_ciclo_p ->apaga_LED_Vermelho=0;
        pointer_ciclo_p ->trava_ciclo_logica=0;
        pointer_ciclo_p ->destrava_ciclo_logica=1;
        flag=1;
    }

    if( (botoes.off==1) ){
        pointer_ciclo_p ->deslig_solicitado=1;
    }

    if( (pointer_ciclo_p ->marcha_atual==1) && (pointer_ciclo_p->
deslig_solicitado==1) && (flag==0) ){
        pointer_ciclo_p ->marcha_atual=0;
        pointer_ciclo_p ->deslig_solicitado=0;
        pointer_ciclo_p ->ciclista_parado=1;
        pointer_ciclo_p ->sistema_em_op=0;
        flag=1;
    }
}

```

```

}

void fc_ciclo_status (struct Ciclo_2 *pointer_ciclo_s, struct
Ciclo_1 cp, struct ciclo_BC cbc){

    int flag;

    flag=0;

    if( (flag==0) && (cp.mudanca_efetuada==1) && (cbc.cima==1) ){
        pointer_ciclo_s ->marcha[pointer_ciclo_s ->i]=0;
        pointer_ciclo_s ->marcha[pointer_ciclo_s ->i+1]=1;
        pointer_ciclo_s ->i = pointer_ciclo_s ->i+1;
        flag=1;
    }

    if( (flag==0) && (cp.mudanca_efetuada==1) && (cbc.baixo==1) ){
        pointer_ciclo_s ->marcha[pointer_ciclo_s ->i]=0;
        pointer_ciclo_s ->marcha[pointer_ciclo_s ->i-1]=1;
        pointer_ciclo_s ->i = pointer_ciclo_s ->i-1;
        flag=1;
    }

}

}

void leitura_botoes(struct botao *pointer_botao, struct teclas tc){

    /*obtem leitura da botoeira*/
}

void leitura_sensor (struct ciclista *pointer_usuario, struct teclas
tc){

    /*obtem leitura dos sensores*/
}

void fc_ciclo_modos (struct ciclo_modos *pointer_ciclo_m, struct botao
*pointer_botao){

    int flag;
    flag=0;

    if( (pointer_botao ->mud_modos==PRESS) && (flag==0) &&
(pointer_ciclo_m ->modos==AUTOMATICO) ){
        pointer_botao ->mud_modos=0;
        pointer_ciclo_m ->modos = MANUAL;
        flag=1;
        *mud_tela=SIM;
    }

    if( (pointer_botao ->mud_modos==PRESS) && (flag==0) &&
(pointer_ciclo_m ->modos==MANUAL) ){
        pointer_botao ->mud_modos=0;
        pointer_ciclo_m ->modos = AUTOMATICO;
    }
}

```



```

        flag=1;
        *mud_tela=SIM;
    }
}

void fc_ciclo_funcionalidade(struct ciclo_funcionalidade
*pointer_ciclo_f, struct botao *pointer_botao, int *mud_tela){

    int i;

    for(i=0; i<N_FUNC; i++){
        if( (pointer_botao ->func[i]==PRESS) && (pointer_ciclo_f
-> estado_funcionalidade[i]==DESATIVADO) ){
            pointer_ciclo_f -
>estado_funcionalidade[i]=ATIVADO;
            *mud_tela=SIM;
            pointer_botao ->func[i]=0;

        }
        if( (pointer_botao ->func[i]==PRESS) && (pointer_ciclo_f
-> estado_funcionalidade[i]==ATIVADO) ){
            pointer_ciclo_f -
>estado_funcionalidade[i]=DESATIVADO;
            *mud_tela=SIM;
            pointer_botao ->func[i]=0;

        }
    }
}

void fc_ciclo_logica_mudanca (struct Ciclo_3 *pointer_ciclo_3,
struct botao *pointer_botao, struct ciclista usuario, struct Ciclo_1
cp, struct ciclo_modos cm, struct ciclo_funcionalidade cf, struct
Ciclo_2 cs, struct estado_LEDs *pointer_estado_LEDs, struct ciclo_BC
*pointer_ciclo_BC, int n){

    int flag[5], i;

    flag[0]=0;
    flag[1]=0;
    flag[2]=0;
    flag[3]=0;
    flag[4]=0;

    if( (pointer_botao ->botao[n]==PRESS) && (flag[4]==0) ){
        pointer_botao ->botao[n]=0;
        pointer_ciclo_3 ->botao_acionado=1;
        flag[4]=1;
    }

    if( (pointer_ciclo_3 ->botao_acionado==1) && (flag[4]==0) &&
( ( (cs.marcha[6]==0) && (n==B_CIMA) ) || ( (cs.marcha[0]==0)
&&(n==B_BAIXO) ) ) ){
        pointer_ciclo_3 ->botao_acionado=0;
        pointer_ciclo_3 ->mudanca_solicitada=1;
    }
}

```

```

        if (n==B_BAIKO)
            pointer_ciclo_BC ->baixo=1;
        if (n==B_CIMA)
            pointer_ciclo_BC ->cima=1;
        flag[4]=1;
    }

    if( (pointer_ciclo_3 ->mudanca_solicitada==1) &&
(cp.destrava_ciclo_logica==1) ){
        if( (flag[0]==0) && (flag[1]==0) && (flag[2]==0) &&
(flag[3]==0) && (flag[4]==0) ){
            pointer_ciclo_3 ->mudanca_solicitada=0;
            pointer_ciclo_BC ->baixo=0;
            pointer_ciclo_BC ->cima=0;
            flag[0]=1;
            flag[1]=1;
            flag[2]=1;
            flag[3]=1;
            flag[4]=1;
        }
    }

    if( (cm.moda == AUTOMATICO) ){

        for (i=0; i<N_FUNC; i++){

            if( (pointer_ciclo_3 ->estado_inicial[i]==1) &&
(flag[i]==0) && cp.trava_ciclo_logica==0 ){
                pointer_ciclo_3 -> leitura_sensor[i]=1;
                pointer_ciclo_3 ->estado_inicial[i]=0;
                flag[i]=1;
            }

            if( (cf.estado_funcionalidade[i]==ATIVADO) &&
(pointer_ciclo_3 -> leitura_sensor[i]==1) && (flag[i]==0) ){

                pointer_ciclo_3 ->leitura_sensor[i]=0;
                pointer_ciclo_3 ->primeira_comparacao[i]=1;
                pointer_ciclo_3 ->resultado_comparacao[i] =
funcionalidade(i,n,usuario);
                flag[i]=1;
            }

            if( (pointer_ciclo_3 ->primeira_comparacao[i]==1)
&& (pointer_ciclo_3 ->resultado_comparacao[i] ==OK) && (flag[i]==0)
){
                pointer_ciclo_3 ->envio_LED[i]=1;
                envio_LED_Verde(ACENDE, i);
                pointer_estado_LEDs ->LED_Verde=ACESO;
                pointer_ciclo_3 ->primeira_comparacao[i]=0;
                flag[i]=1;
            }
        }
    }

```

```

        if( (pointer_ciclo_3 ->primeira_comparacao[i]==1)
        && (pointer_ciclo_3 ->resultado_comparacao [i]==NO)&& (flag[i]==0)
        ){
            pointer_ciclo_3 ->primeira_comparacao[i]=0;
            pointer_ciclo_3 ->estado_inicial[i]=1;
            flag[i]=1;
        }

        if( (pointer_ciclo_3 ->envio_LED[i]==1) &&
        (flag[i]==0) ){
            pointer_ciclo_3 ->contando[i] =
            contagem(pointer_ciclo_3, i);
            if
            (cf.estado_funcionalidade[i]==DESATIVADO){
                pointer_ciclo_3 ->contando[i]=0;
                pointer_ciclo_3 ->estado_inicial[i]=1;
                pointer_ciclo_3 ->contador[i]=0;
                flag[i]=1;
            }
        }

        if( (pointer_ciclo_3 ->contando[i]==1) &&
        (flag[i]==0) ){
            pointer_ciclo_3 ->contando[i]=0;
            pointer_ciclo_3 ->envio_LED[i]=0;
            pointer_ciclo_3 ->segunda_comparacao[i]=1;
            pointer_ciclo_3 ->resultado_comparacao[i] =
            funcionalidade(i,n,usuario);
            flag[i]=1;
        }

        if( (pointer_ciclo_3 ->segunda_comparacao[i]==1)
        && (flag[i]==0) && (pointer_ciclo_3 ->resultado_comparacao[i] ==OK)
        ) {
            if( ( (cs.marcha[6]==0) && (n==B_CIMA) ) || (
            (cs.marcha[0]==0) && (n==B_BAIXO) ) ){
                pointer_ciclo_3 ->segunda_comparacao[i]=0;
                pointer_ciclo_3 ->mudanca_solicitada=1;
                if (n==B_BAIXO)
                    pointer_ciclo_BC ->baixo=1;
                if (n==B_CIMA)
                    pointer_ciclo_BC ->cima=1;
                pointer_ciclo_3 ->resultado_comparacao[i]=0;
                pointer_ciclo_3 ->estado_inicial[i]=1;
                flag[i]=1;
            }
        }

        if( (pointer_ciclo_3 ->segunda_comparacao[i]==1)
        && (flag[i]==0) && (pointer_ciclo_3 ->resultado_comparacao[i]==NO)
        ){
            pointer_ciclo_3 ->segunda_comparacao[i]=0;
            pointer_ciclo_3 ->estado_inicial[i]=1;
            flag[i]=1;
        }

```

```

    }

}

void envio_atuador(void){

}

void envio_LED_Vermelho(void){

    /*Função de envio de sinal ao LED Vermelho*/
}

void envio_LED_Verde(int opcao, int k){

    /*Função de envio de sinal ao LED Verde*/
}

int funcionalidade (int i, int opcao, struct ciclista usuario){

    switch (i){
        case 0:
            if(opcao==B_CIMA){

                if(usuario.BPM<usuario.limiar_treinamento)
                    return (OK);

                else
                    return (NO);
            }
            else
                return (NO);

        case 1:
            if(opcao==B_BAIXO){

                if(usuario.BPM>usuario.limite_treinamento)
                    return (OK);

                else
                    return (NO);
            }
            else
                return (NO);

        case 2:
            switch (opcao){
                case B_BAIXO:

                    if(usuario.dRPM>usuario.valor_base_B)
                        return (OK);

                    else
                        return (NO);

                case B_CIMA:

```

```

        if(usuario.dRPM>usuario.valor_base_C)
            return(OK);

        else
            return(NO);

    }
    case 3:
    switch (opcao){
        case B_BAIXO:

            if(usuario.RPM<usuario.rotacao_set)
                return(OK);

            else
                return(NO);

        case B_CIMA:

            if(usuario.RPM>usuario.rotacao_set)
                return(OK);

            else
                return(NO);

    }
    default:
        return (NO);
}

```